

ҚАТТЫЛЫҚТЫ ӨЛШЕУДІҢ ТАРИХЫ, ҚАЗІРГІ ЖЕТІСТІКТЕРІ ЖӘНЕ ДАМУ БОЛАШАҒЫ

АНДАТПА

Металл конструкцияларының қауіпсіздігі көбінесе олардың нақты жағдайымен анықталады, онда қаттылықты сынау әдісі оны бағалауда маңызды рөл атқарады. Бұл әдістер құрылымдарды диагностикалауда келесі мақсаттарда қолданылады:

- материал бойынша бастапқы деректер болмаған немесе толық болмаған кезде техникалық объектіні алғашқы аттестаттау;
- металдың физикалық-механикалық күйінің өзгеруіне жұмыс жағдайларының әсерін анықтау үшін техникалық объектіні диагностикалау;
- техникалық объектіні одан әрі пайдалану ұзақтығын анықтау үшін диагностикалау.

Қолданыстағы құрылымдардың көпшілігі үшін қаттылық механикалық қасиеттердің бірден-бір өлшенетін көрсеткіші болып табылады, өйткені зертханалық зерттеулер үшін сынамалар мен үлгілерді алу іс жүзінде мүмкін емес. Бұл қаттылықты өлшейтін құралдардың көмегімен металдардың қаттылығын өлшеу әдістерін әзірлеуге және қолдануға әкелді.

Түйін сөздер: қаттылықты өлшеу, анықтау әдісі, металдың қаттылығы

ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТВЕРДОМЕТРИИ

АННОТАЦИЯ

Безопасность работы металлических конструкций во многом определяется их фактическим состоянием, важную роль в оценке которого занимают метод твердометрии. Эти методы находят применение при диагностировании конструкций с целью:

- первичной паспортизации технического объекта, когда отсутствуют или имеются не полные исходные данные о материале;
- диагностирования технического объекта для определения влияния условий эксплуатации на изменение физико-механического состояния металла;
- диагностирования технического объекта для определения продолжительности его дальнейшей эксплуатации.

Для большинства действующих конструкций твердость является единственно доступным к измерению показателем механических свойств, так как отбор проб и образцов для лабораторных исследований практически невозможен. Это обусловило развитие и применение методов измерения твердости металлов с помощью твердомеров.

Ключевые слова: измерение твердости, метод определения, твердость металла

HISTORY, MODERN ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SOLIDOMETRY

ANNOTATION

The safety of metal structures is largely determined by their actual condition, an important role in the assessment of which is occupied by the method of hardness testing. These methods are used in the diagnosis of structures in order to:

- primary certification of a technical object when there are no or incomplete initial data on the material;
- diagnostics of a technical object to determine the effect of operating conditions on changes in the physical and mechanical state of the metal;
- diagnostics of a technical facility to determine the duration of its further operation.

For most existing structures, hardness is the only measurable indicator of mechanical properties, since sampling and sampling for laboratory studies is practically impossible. This led to the development and application of methods for measuring the hardness of metals using hardness meters.

Keywords: hardness measurement, determination method, metal hardness



Введение

Стремительное развитие науки и технологий за последнее десятилетие, в особенности получение новых материалов по нанотехнологиям привели к острой необходимости в оценке физико-механических свойств этих материалов.

Понятие твердости металлов известно человечеству уже более 280 лет. Впервые изобрел метод определения твердости в 1722 г. Реомюр Рене Антуан - французский естествоиспытатель, почетный член Петербургской Академии наук. Сущность этого метода определения твердости заключалась во вдавливании двух треугольных призм одна в другую ребрами, расположенными под прямым углом и измерении впоследствии полученных углублений [1].

Обобщая все известные теории твердости можно дать следующее определение твердости, которое наиболее точно характеризует физическую сущность этого метода: «Под твердостью понимается способность материала сопротивляться внедрению в его поверхность более твердого тела – индентора» [2].

1. Определение твердости и методы определения твердости

Исторически с развитием технологий обработки металлов появлялись и совершенствовались способы контроля качества металлических изделий.

Известно множество способов определения твердости металлов и сплавов:

- ✓ вдавливание индентора под действием статической нагрузки (нагрузка прикладывается плавно) - по методу Бринелля, Роквелла, Супер-Роквелла, Виккерса, М.С.Дрозда, Герца, Лудвика, монотрон Шора;

- ✓ динамическое вдавливание индентора (нагрузка прикладывается ударом) - по методу Мартеля, Польди, вертикальный копер Николаева, пружинный прибор Шоппера и Баумана, маятниковый копер Вальцеля, маятник Герберта, маятниковый склерометр Кузнецова;
- ✓ измерение микротвердости статическим вдавливанием - по методу Липса, Егорова, Хрущева, Скворцова, Алехина, Терновского, Шоршорова, Берковича, Кнупа, Петерса, Эмерсона, микротвердомер Цейсса-Ганеманна;
- ✓ метод упругого отскока бойка - склероскоп Шора;
- ✓ измерение твердости царапанием - по Моосу, напильник Барба, прибор Мартенса, Хенкинса, микрохарактеризатор Бирбаума, склерометр О'Нейля, Григорович, Беркович).

В целом, по характеру воздействия индентора на поверхность исследуемого объекта можно узнать конкретные свойства материала: вдавливание определяет способность к сопротивлению пластической деформации, отскок показывает упругие свойства, царапание характеризует сопротивление разрушению [3].

Многие приемы сейчас используются редко или вовсе ушли в прошлое.

На данный момент основные и самые распространенные методы контроля твердости металлов условно делят на две группы: прямые и косвенные [4].

Прямые методы измерения твердости основаны на способности материала сопротивляться внедрению другого, более твердого тела -





индентора. Инденторы изготавливаются в форме конуса или пирамиды из алмаза, в форме шарика - из закаленной стали или карбида вольфрама.

Прямые методы реализуют в основном стационарные твердомеры по шкалам Бринелля (HB), Роквелла (HRA, HRB, HRC), Супер-Роквелла (HRN и HRT), Виккерса (HV).

Сущность испытаний заключается в том, что после внедрения индентора, при приложении заданной статической нагрузки, происходит пластическая деформация исследуемого материала. На поверхности образца остается отпечаток [5].

Вычисление значения твердости строится на зависимости приложенного усилия и определенных геометрических параметров отпечатка. Для каждого прямого метода предусмотрена своя зависимость (см. таблицу ниже). Например, при замерах по Роквеллу фиксируется глубина отпечатка: чем она меньше, тем выше твердость объекта.

Плюсы: стационарные твердомеры применяются для контроля любых металлов и сплавов; выдают результат с минимальной погрешностью; не требуют дополнительной калибровки.

Минусы: работают на одном месте, как правило в специально оборудованной лаборатории; необходимо заранее готовить образцы, либо изделие должно иметь конкретные габариты; необходима квалификация оператора; невысокая скорость выполнения исследований.

Косвенные методы измерения твердости подразделяются на ультразвуковой и динамический - они не напрямую измеряют твердость, а только оценивают значение твердости металла в зависимости от других физических свойств.

Косвенные методы реализуют портативные твердомеры - ультразвуковые и динамические. Результат можно получить как в самых распространенных единицах твердости, таких как Роквелл С (HRC), Бринелль (HB), Виккерс (HV), так и в реже используемых единицах Роквелла А и В (HRA, HRB), Шора D (HSD) и других.

Ультразвуковой метод (ультразвуковой контактный импеданс) основан на фиксации степени затухания резонансной частоты колебаний металлического стержня с алмазным наконечником (индентором) при внедрении его в поверхность металлического изделия.

При глубоком внедрении индентора в мягкий металл будет большая площадь контакта алмаза с материалом, значит будет выше степень затухания частоты колебаний. Применим к изделиям практически любых габаритов по массе и размерам; оставляет незаметный отпечаток; подходит для измерения твердости поверхностно упрочненных слоев; удобен для образцов со сложной конфигурацией (шестерни, подшипники, метизы). Применение на изделиях с крупнозернистой структурой ограничено (чугуны, бронза).



Динамический метод (Либа) основан на определении отношения скорости бойка при отскоке от поверхности измеряемого образца к скорости бойка при соударении с поверхностью образца. В качестве бойка используется твердосплавный шарик (карбид вольфрама WC-Co).

Чем ниже твердость металла, тем больше энергии удара уходит на формирование отпечатка и тем меньше скорость отскока бойка. Подходит для массивных изделий; образцов с высокошероховатой поверхностью; объектов со значительной толщиной упрочненного или закаленного слоя.

Плюсы: портативные твердомеры автономны, просты в управлении, работают в труднодоступных зонах, обладают высокой скоростью проведения замеров. Минусы: погрешность результатов измерений выше, чем у стационарных приборов; иногда требуется дополнительная калибровка шкал.

2. Общие требования к испытаниям

Вне зависимости от величины прилагаемого усилия или затрачиваемой энергии, значение твердости для однородного тела при постоянной температуре должно быть материальной константой [6].

Поверхность объекта должна быть подготовлена в соответствии с методикой измерения.

Образец должен быть надежно зафиксирован, чтобы исключить смещение относительно оси приложения нагрузки со стороны прибора.

Твердость должна иметь совершенно определенный и ясный физический смысл, правильную размерность, характеризующую сопротивление материала пластической деформации.

Чем выше твердость образца, тем более высокая нагрузка нужна при его исследовании. Чем точнее метод, тем выше требования к подготовке поверхности контролируемого экземпляра. Вообще, чем тщательнее будет подготовлен образец для испытаний, тем меньше будет погрешность результата при использовании и стационарного, и портативного твердомера.

3. Классические прямые методы измерения твердости путем внедрения индентора под действием статической нагрузки

Классические прямые методы измерения твердости путем внедрения индентора под действием статической нагрузки приведены в Таблице 1.



Таблица 1. Классические прямые методы измерения твердости

Метод	Принцип вычисления твердости	Шероховатость поверхности образца, Ra	Индентор	Нагрузка	Шкала	Применение
Бринелля	По диаметру отпечатка -- как приложенная нагрузка, деленная на площадь поверхности отпечатка (кгс/мм ²)	1,25 - 2,5	Твердосплавный шарик диаметром 1; 2,5; 5 и 10 мм	1 кгс (9,8Н) - 3000 кгс (29420Н)	HB	Закаленные и незакаленные стали, мягкие металлы и сплавы (свинец, олово), титан, медь, алюминий, чугун, высокопрочные сплавы (на основе никеля, кобальта и др.), подшипниковые сплавы
Роквелла	По глубине вдавливания -- как относительная разница в глубине вдавливания индентора при приложении основной и предварительной (10 кгс) нагрузки	0,38 - 2,5	Алмазный конус с углом при вершине 120°	60 кгс (588Н)	HRA	Алмазный конус с углом при вершине 120°
			Твердосплавный шарик диаметром 1/16 дюйма (1,588 мм)	100 кгс (980Н)	HRB	Твердосплавный шарик диаметром 1/16 дюйма (1,588 мм)
			Алмазный конус с углом при вершине 120°	150 кгс (1471Н)	HRC	Алмазный конус с углом при вершине 120°
Супер-Роквелла		0,08 - 0,16	Алмазный конус с углом при вершине 120° или твердосплавный шарик диаметром 1/16 дюйма (1,588 мм)	15 кгс (147,1Н) 30 кгс (294,2Н) 45 кгс (441,3Н)	HRN, HRT	Алюминиевые сплавы, детали с упрочненными поверхностными слоями, тонкие малогабаритные образцы
Виккерса	Производится деление нагрузки на площадь боковой поверхности полученного отпечатка	02 - 0,04	Алмазный индентор в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом 136° между противоположными гранями	1 кгс (9,8Н) - 100 кгс (980Н)	HV	Высокопрочные стали, чугун, цветные металлы и сплавы; закаленные и незакаленные стали, литые; тонкие листовые материалы; поверхности с гальваническим (цинкование, хромирование), азотированным, луженым покрытием различной толщины
Микро-Виккерса				0,01 кгс (0,098Н) - 5 кгс (49Н)		Тонкие закаленные слои; анодированные, цементированные, азотированные детали; поверхности с тонким гальваническим покрытием; изделия из высокопрочных металлов и сплавов; тонколистовые стали



4. Метод Бринелля

Метод Бринелля - один из основных методов определения твёрдости.

Этот метод относится к методам вдавливания. Испытание проводится следующим образом: вначале дают небольшую предварительную нагрузку для установления начального положения индентора на образце, затем прилагается основная нагрузка, образец выдерживают под её действием, измеряется глубина внедрения, после чего основная нагрузка снимается. При определении твёрдости методом Бринелля, в отличие от метода Роквелла, измерения производят до упругого восстановления материала. Индентор (полированный закалённый стальной шарик) вдавливают в поверхность испытуемого образца (толщиной не менее 4 мм) с регламентированным усилием. Через 30 с после приложения нагрузки измеряют глубину отпечатка. В другом варианте усилие прилагается до достижения регламентированной глубины внедрения [7].

Твёрдость по Бринеллю HB рассчитывается как «приложенная нагрузка», делённая на «площадь поверхности отпечатка»:

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

где P - приложенная нагрузка, Н;
 D - диаметр шарика, мм;
 d - диаметр отпечатка, мм,
 или по формуле:

$$HB = \frac{P}{\pi Dh} \quad (2)$$

где h - глубина внедрения индентора.

Нормативными документами определены диаметры индентора, время экспозиции, глубина внедрения индентора.

В Республике Казахстан регламентированные нагрузки 49 Н, 127 Н, 358 Н, 961 Н, диаметр шарика 5 мм, глубины внедрения от 0,13 до 0,35 мм. В разных спецификациях эти значения различны.

Наиболее распространённые диаметры шарика — 10, 5, 2,5 и 1 мм и нагрузки 187,5 кгс, 250 кгс, 500 кгс, 1 000 кгс и 3 000 кгс.

Для выбора диаметра шарика обычно используют следующее правило: диаметр отпечатка должен лежать в пределах 0,2—0,7 диаметра шарика.

В методиках ISO и ASTM объединены метод с одним шариком и разными нагрузками и метод с применением разных шариков, а также дана формула вычисления твёрдости, не зависящей от нагрузки.

Твёрдость по шкале Бринелля выражают в кгс/мм². Для определения твёрдости по методу Бринелля используют различные твердомеры, как автоматические, так и ручные.

Таблица 2. Типичные значения твёрдости Бринелля для различных материалов

Материал	Твёрдость
Мягкое дерево, например сосна	1,6 HBS 10/100
Твёрдое дерево	от 2,6 до 7,0 HBS 10/100
Алюминий	15 HB
Медь	35 HB
Дюраль	70 HB
Мягкая сталь	120 HB
Нержавеющая сталь	250 HB
Стекло	500 HB
Инструментальная сталь	650—700 HB

Преимущества метода Бринелля:

Зная твёрдость по Бринеллю, можно быстро найти предел прочности и текучести материала, что важно для прикладных инженерных задач:

Для стали

$$\sigma_B = \frac{HB}{3} \left[\frac{kgf}{mm^2} \right] = \frac{10HB}{3} [MPa] \quad (3)$$

где σ_B - предел прочности.

$$\sigma_T = \frac{HB}{6} \left[\frac{kgf}{mm^2} \right] = \frac{10HB}{6} [MPa] \quad (4)$$

где σ_T - предел текучести.



Для алюминиевых сплавов

$$\sigma_B = 0,362HB \left[\frac{kgf}{mm^2} \right] = 3,62HB [MPa] \quad (5)$$

Для медных сплавов

$$\sigma_B = 0,26HB \left[\frac{kgf}{mm^2} \right] = 2,6HB [MPa] \quad (6)$$

Так как метод Бринелля - один из самых старых, накоплено много технической документации, где твёрдость материалов указана в соответствии с этим методом.

Данный метод является более точным по сравнению с методом Роквелла на более низких значениях твёрдости (ниже 30 HRC).

Также метод Бринелля менее критичен к чистоте подготовленной под замер твёрдости поверхности.

5. Измерение твердости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла

При определении твердости по Роквеллу, методе разницы глубины, измеряют остаточную глубину вдавливания индентора.

Чем глубже определенный индентор при определенном усилии испытания проникает в поверхность заготовки (образца), тем мягче испытываемый материал. Из остаточной глубины проникновения, а также некоторых других факторов (см. ниже) можно определить твердость по Роквеллу (HR).

При определении твердости по Роквеллу, общее усилие испытания прикладывается в два этапа. Это позволяет исключить влияние неровности поверхности образца (например, наличие канавок), а также ошибок измерения вследствие зазора измерения глубины проникновения.

Процесс определения твердости по Роквеллу (HR) согласно ISO 6508

1 этап. Сначала индентор с преднагрузкой (ее также называют предварительным усилием) вплоть до глубины проникновения h_0 вдавливается в испытываемый образец [8]. Значение h_0 определяет базовую плоскость для последующего измерения остаточной глубины проникновения (h) [9].

2 этап. Затем прикладывается дополнительное испытательное усилие в течение регламентированного в стандарте срока воздействия (несколько секунд), причем индентор вдавливается в образец вплоть до максимальной глубины проникновения h_1 . Сумма предварительного усилия и дополнительного усилия создает общее усилие испытания (его также называют главное усилие или основная нагрузка).

3 этап. По прошествии срока воздействия дополнительное испытательное усилие сбрасывается, индентор перемещается на упругую составляющую глубины проникновения на общем усилии испытания назад в исходную позицию и останавливается на высоте остаточной глубины проникновения h (0,002 или 0,001 мм). Ее также называют разницей глубины (разница глубины проникновения до и после приложении общего усилия испытания). На основе остаточной глубины проникновения h можно рассчитать твердость по Роквеллу (HR) по регламентированной в стандарте ISO 6508 формуле с помощью соответствующей шкалы Роквелла [10].

При методе по Роквеллу отпечатки следует наносить таким образом, чтобы было достаточное расстояние до кромки образца, а также между отдельными отпечатками. Минимальные значения, которые по стандарту следует соблюдать, указаны в графике ниже.

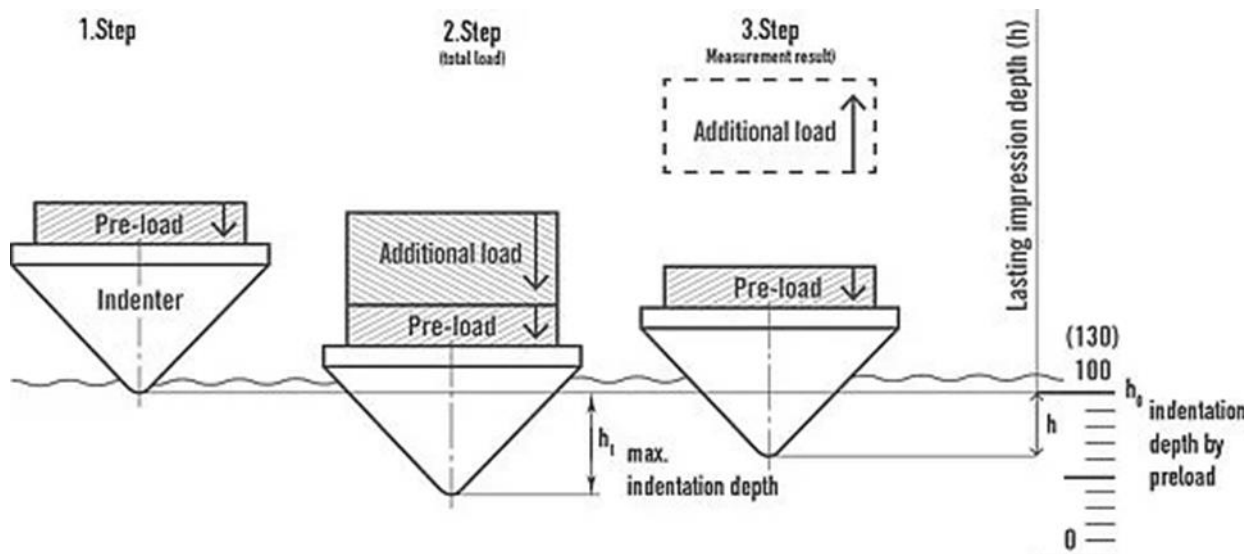


Рисунок 1 - Этапы определения твердости по Роквеллу



Преимуществами метода определения твердости по Роквеллу являются следующие [11]:

- ✓ нет необходимости в подготовке образцов (резка, шлифовка, запрессовка);
- ✓ возможность прямого считывания значения твердости, оптический анализ не требуется (измерение диагоналей, как при оптических методах);
- ✓ быстрый (короткий испытательный цикл) и экономичный метод (машины для определения твердости сравнительно дешевы, т.к. их не требуется оснащать дорогостоящей оптикой, в отличие от машин для оптических методов по Бринеллю, Виккерсу и Кнупу);
- ✓ неразрушающий контроль, заготовку можно продолжать использовать [12].

В Таблице 3 представлены методы определения твердости по Роквеллу.

Таблица 3. Методы определения твердости по Роквеллу

Метод	Индентор	Главный груз (кгс)	Области применения
HRA	Алмаз 120°	60	цементированные стали и сплавы, твердые сплавы
HRBW	Шарик 1/16"	100	медные (Cu) сплавы, незакаленные стали (в США также для стали до 686Н/мм ²)
HRC	Алмаз 120°	150	цементированные стали и сплавы, твердые сплавы
HRD	Алмаз 120°	100	цементированные стали и сплавы, твердые сплавы
HREW	Шарик 1/8"	100	алюминиевые (Al) сплавы, медные (Cu) сплавы
HRFW	Шарик 1/16"	60	тонкая, мягкая листовая сталь
HRGW	Шарик 1/16"	150	бронза, медь (Cu), чугун
HRHW	Шарик 1/8"	60	алюминий (Al), цинк (Zn), свинец (Pb)
HRKW	Шарик 1/8"	150	подшипниковые сплавы и другие очень мягкие или тонкие материалы, включая пластмассы (см. ASTM D785)
HRLW	Шарик 1/4"	60	
HRMW	Шарик 1/4"	100	
HRPW	Шарик 1/4"	150	
HRRW	Шарик 1/2"	60	
HRSW	Шарик 1/2"	100	
HRVW	Шарик 1/2"	150	

В Таблице 4 представлены методы определения твердости по Супер-Роквеллу и способы их применения. Преднагрузка для всех методов составляет 3 кг [13].

Таблица 4 Методы определения твердости по Супер-Роквеллу

Метод	Индентор	Главный груз (кгс)	Области применения
HR15N	Алмаз 120°	15	заготовки с тонким цементованием
HR30N		30	
HR45N		45	
HR15TW	Шарик 1/16"	15	тонкий листовой металл
HR30TW		30	
HR45TW		45	
HR15WW	Шарик 1/8"	15	алюминий (Al), цинк (Zn), свинец (Pb), белая жель
HR30WW		30	
HR45WW		45	
HR15XW	Шарик 1/4"	15	алюминий (Al), цинк (Zn), свинец (Pb), белая жель
HR30XW		30	
HR45XW		45	
HR15YW	Шарик 1/2"	15	алюминий (Al), цинк (Zn), свинец (Pb), белая жель
HR30YW		30	
HR45YW		45	

6. Производство мер твердости в Республике Казахстан

Эталонные меры твердости изготавливаются на базе Карагандинского филиала Республиканского государственного предприятия «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» в соответствии с ГОСТ 9031-75 «Меры твердости образцовые. Технические условия» из углеродистых и легированных сталей, имеют прямоугольную форму. Типы эталонных мер твердости по шкалам Бринелля МТБ-К, Роквелла - МТР-К, Супер-Роквелла - МТСР-К утверждены и зарегистрированы в реестре ГСИ РК.

Меры твердости эталонные предназначены для поверки/калибровки, а так же настройки и контроля работоспособности приборов для измерений твердости металлов и сплавов.

Производство мер твердости эталонных включает в себя 4 основных этапа:

1. Нагрев и выдержка

Оборудованием для нагрева является муфельная термическая печь ПМ-16М-1200-В

Для закалки мер твердости, их два-три раза опускают на несколько минут в соляные ванны и держат короткое время в печи, нагретых до температур +400 до +500 °С. Период выдержки определяется количеством металла в печи. Все меры твердости должны прогреваться равномерно.



Температуру нагрева измеряют с помощью пирометров – контактных и бесконтактных, инфракрасных приборов.

Данный вид стали обрабатывают при температуре 850-870 °С при закалке, с последующим охлаждением в технической воде или масле. После закалки пружинно-рессорные стали рекомендуется обработать при помощи отпуска с соблюдением температуры 450-520 °С.

2. Охлаждение

Для охлаждения используется вода – чистая или с растворенными в ней солями, щелочные растворы. Для легированных сталей используется обдув или охлаждение в минеральных маслах. В изотермических и ступенчатых процессах для охлаждения используются расплавы солей, щелочей и металлов. Такие среды могут чередоваться между собой.

3. Отпуск

Отпуск осуществляется в масляной ванне, проводимый при +150 до +200°С. Отпуск служит для устранения внутренних напряжений, повышения пластичности и вязкости без существенного ухудшения твердости.

4. Шлифование

Выполняется финишная обработка шлифовальным станком, которая характеризуется идеально гладким состоянием поверхности мер твердости.

Заключение

Представлено научно обоснованное строгое определение твердости материалов.

Предложены расчетные формулы для определения истинной твердости материалов с использованием различных по форме инденторов (шарик Роквелла, Супер-Роквелла, конус, пирамида Виккерса, Бринелля).

Доказано, что истинная твердость материала зависит прежде всего от геометрической формы индентора, глубины его внедрения, величины прилагаемой нагрузки.

Рассмотрен процесс производства мер твердости в условиях Карагандинского филиала РГП «КазСтандарт».

Выявлен размерный эффект при определении истинной твердости инденторами различной формы (шарик, конус, пирамида), который носит подобный характер. Установлено, что при получения более информативной оценки твердости необходимо проводить испытания в широком диапазоне нагрузок и рассчитывать истинную твердость, учитывающую максимальный размерный эффект во всем интервале индентирования, особенно при низких усилиях внедрения.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

КНИГИ

1. **DIN 50359-1.** Testing of metallic materials - Universal hardness test – Part 1: Test method. – 15 p.
2. **ISO 14577-1.** Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method, 2002. – 31 p.
3. **Брокгауз Ф.А., Ефрон И.А.** Энциклопедический словарь в 86 томах, СПб, 1882- 1904 гг., т.13.
4. **Булычев С.И., Алехин В.П.** Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
5. **Лактин Ю.М., Леонтьева В.П.** Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 558 с.
6. **Малинин Н.Н.** Кто есть кто в сопротивлении материалов // Под ред. В.Л. Данилова. – М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 248 с.
7. **Материаловедение: Учебник для вузов /** Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин. – 3-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. –648 с.
8. **Мотт Б.В.** Испытание на твердость микровдавливанием // Пер. с англ. под ред. Е.С. Берковича. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 340 с.
9. **Пилипчук Б.И.** Обзор теорий твердости. М-Л.: Стандартгиз, 1962. – 112 с.
10. **Иванова В.С.** Ускоренный метод определения предела выносливости / В.С. Иванова. – М. : Машиностроение, 1974. – 174 с. 5.
11. **Гребенюк В.М.** Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности) : справочник / В.М. Гребенюк, В.К. Цапко. – М. :Металлургия, 1989. –592 с.
12. **Лебедев А.А.** Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости в нагруженном и разгруженном состоянии / А.А. Лебедев, В.П. Швец // Проблемы прочности. – 2008. – № 3. – С. 29–37
13. **Векслер Е.Я.** Неразрушающие методы контроля механических свойств металла энергооборудования в процессе длительной эксплуатации по твердости с использованием современных переносных твердомеров / Е.Я. Векслер, И.В. Замекула, В.Ю. Толстов, Е.В. Семешко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 1. – С. 39–42.
14. **Карпаш О.М.** Общий обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов / О.М. Карпаш, И.А. Молодецкий, М.О. Карпаш // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 2. – С. 18–22.

ВЕБ-САЙТЫ

1. **Сайт Казахстанского института стандартизации и метрологии Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан**
<https://ksm.kz/filialy/karagandinskiy-filial/etalonnye-mery-tverdosti.php>
2. **Сайт российского производителя Искролайн URL.** <https://www.iskroline.ru/articles/tverdomer/>