

УДК 620.172: 620.178: 620.179.12

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА  
МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

*канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ, А.В. КРЫЛЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрено определение физико-механических характеристик материала деталей и конструкций неразрушающим способом, заключающимся в анализе характера упруго-пластического взаимодействия материала с индентором при определении твердости по Виккерсу.*

Востребованность неразрушающего контроля металла оборудования и конструкций возрастает с каждым годом из-за проблемы старения промышленного оборудования на предприятиях Республики Беларусь. Для уточнения текущего состояния металла такого оборудования с учетом фактических значений физико-механических характеристик металла использование неразрушающего контроля может быть особенно полезным и эффективным. Поэтому выполнение работ по техническому диагностированию и определению физико-механических свойств на основе разработки новых способов определения состояния металла в диагностируемой конструкции (преимущественно неразрушающими методами) является весьма актуальной задачей, в первую очередь, для нефтехимической промышленности.

При проведении исследований были поставлены следующие задачи:

- 1) выполнить обзор существующих методов определения твердости и выбрать наилучший способ с позиций требований к универсальности метода;
- 2) выполнить обзор существующих зависимостей основных механических свойств металла от твердости и/или параметров отпечатка, полученных при определении твердости и других характеристик механических свойств и выбрать наиболее достоверные;
- 3) разработать методику неразрушающего определения характеристик прочности ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), пластичности ( $\delta_5$ ,  $\psi$ ) и ударной вязкости (КСУ) металла по параметрам отпечатков, полученных при определении твердости по Виккерсу.

Объектом исследования являются косвенные методы определения основных характеристик механических свойств, взаимосвязь механических свойств с результатами, полученными при определении твердости по Виккерсу, а также определение текущего состояния металла оборудования и конструкций. Предметом исследования являются основные характеристики механических свойств металла ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ , КСУ).

В исследованиях использованы объекты (детали, элементы конструкций, конструкции, аппараты), подверженные эксплуатационному старению. В процессе исследований измерялась твердость по Виккерсу по ГОСТ 2999 и переносными твердомерами Microdur I, Microdur II, определялись параметры отпечатка (ширина, диагональ, высота волны вокруг отпечатка), механические свойства определялись по ГОСТ 1497, 9454, 7268, а также косвенными методами по оригинальной методике.

Среди неразрушающих безобразцовых способов определения механических свойств наиболее широкое распространение получили методы, основанные на определении твердости. Методы измерения твердости получили широкое распространение благодаря следующим достоинствам:

- 1) между твердостью пластичных металлов, определяемой способом вдавливания, и другими механическими свойствами (например, пределом прочности  $\sigma_B$ ), существует количественная зависимость (например,  $\sigma_B \approx C \cdot HB$ );
- 2) неразрушающий метод испытаний (измерение твердости) не влечет за собой разрушения изделия и серьезных его повреждений, и после измерения его можно использовать по своему назначению (вместе с тем, для определения прочности, пластичности и ударной вязкости необходимо изготовление специальных образцов из изделия);
- 3) измерение твердости можно проводить и в тех случаях, когда вырезка образцов из детали невозможна или нежелательна;
- 4) твердость можно измерять на деталях небольшой толщины, а также в очень тонких слоях, не превышающих десятых долей миллиметра или в микрообъемах металла (измерение микротвердости);
- 5) измерение твердости по технике выполнения значительно проще, чем определение прочности, пластичности и ударной вязкости; не требует специальной подготовки поверхности - достаточно обработать небольшой участок напильником или шлифовальной шкуркой;
- 6) обслуживание приборов для измерения твердости несложно с минимальным воздействием субъективных факторов;

7) измерением твердости можно осуществить сплошной контроль деталей и узлов в условиях эксплуатации практически в любом месте, в том числе в сварных швах и зонах термического влияния.

Исследованиями установлено, что наиболее приемлемым с точки зрения простоты и удобства реализации, невысокой стоимости и доступности приборного обеспечения, исключающим местное повреждение исследуемой конструкции, связанное с необходимостью изготовления образцов для механических и металлографических испытаний является именно метод косвенного определения основных механических свойств металла, основанный на определении твердости.

Особый интерес представляет собой установление связи между механическими свойствами металла и результатами экспериментов, полученных при внедрении в него четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$ , в первую очередь, при определении твердости (наличие/отсутствие трещин, их протяженность; вид и форма отпечатка; параметры волны вокруг отпечатка и т.д.). Установив указанную связь, можно будет определять механические свойства поверхностного слоя металла. А это имеет большое значение, поскольку, как показано в работе [1], разрушение металла при изгибе, кручении и растяжении с перекосом начинается с поверхности. Кроме того, из-за воздействия агрессивных сред на поверхности металла наблюдаются наибольшие изменения [2]. Выявление связи между твердостью и механическими свойствами позволит контролировать фактическое состояние металла и прочность конструкций в процессе эксплуатации.

Накопленные различными исследователями экспериментальные данные свидетельствуют о том, что каждый из существующих методов определения твердости дает результаты, зависящие не только от механических свойств испытуемого материала, но и от условий проведения этих испытаний. Таким образом, измерение твердости должно проводиться при установленных стандартных условиях. Поэтому следует найти универсальный способ определения твердости. Можно выделить следующие основные требования к универсальному методу определения твердости:

- 1) он должен быть универсальным, т.е. применимым ко всем без исключения твердым телам - пластичным и хрупким, микроскопическим и большого размера;
- 2) значение твердости, определенное этим способом, для однородного твердого тела при постоянной температуре, должно быть материальной константой - независимой в широких пределах от величин прилагаемой нагрузки или затрачиваемой энергии;
- 3) твердость должна иметь определенный физический смысл и правильную размерность - характеризующую сопротивление материала пластической деформации или хрупкому разрушению;
- 4) результат измерения должен быть точным и воспроизводимым, сама операция - простой и доступной, прибор - надежным по конструкции, удобным в обращении. Для измерения твердости желательно применять приборы, выпускаемые промышленностью.

Анализ существующих методов определения твердости с позиции требований к универсальности метода позволил установить следующее.

Склерометрия - определение сопротивления тел разрушению в процессе резания, истирания, царапания и др. позволяет оценить их сопротивление износу, но не может считаться способом определения твердости (нарушаются требования 2, 3).

Определение твердости по Бринеллю не является универсальным (не выполняется требование 1), так как с помощью закаленного стального шарика нельзя испытать твердость закаленной стали и более твердых материалов [3]. Замена стального шарика алмазным (как при определении твердости по Шору) не решает вопроса, так как потребуются иметь большой набор алмазных шариков разного диаметра для испытаний с различными нагрузками. Твердость по Бринеллю не удовлетворяет также закону механического подобия отпечатков (независимости величины твердости от величины прилагаемой нагрузки и получение геометрически подобных отпечатков) [3].

Способ определения твердости по Роквеллу также не универсален. Он не позволяет измерять твердость хрупких тел (абразивные материалы, стекла, минералы) и тел микроскопического размера (структурные составляющие сплава), так как применяемые нагрузки слишком велики для этих целей и вызывают разрушение указанных тел. Способ имеет неудобства, так как величина твердости одного и того же тела, измеренная с помощью конического и разных сферических инденторов, выражается разными числами. Однако данный способ широко распространен вследствие высокой производительности.

Определение твердости по Виккерсу является наиболее универсальным, так как, используя нагрузки 1...200 гс, возможно измерять твердость как самых хрупких материалов, так и тел микроскопических размеров. Отпечатки, выполненные пирамидальным индентором с разными нагрузками на одном и том же объекте, имеют подобную форму, поэтому твердость является постоянной величиной и не зависит от нагрузки, т.е. отвечает закону механического подобия отпечатков [3].

Поскольку отпечатки, полученные при помощи конического и шарового инденторов, и волна вокруг них имеют вертикальную ось симметрии, и проекция их представляет круг [3, с. 96], то по круглым проекциям отпечатков нельзя сделать дополнительных заключений о механических свойствах металла, кроме его твердости. Необходимым же условием соблюдения закона механического подобия является геометрическое подобие отпечатков и только инденторы в форме пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$  дают подобные отпечатки при любой глубине вдавливания. Поэтому можно сделать вывод, что наиболее универсальным способом определения твердости является метод Виккерса. В случае необходимости работы с микро- и макротвердостью целесообразно работать именно с твердостью по Виккерсу и микротвердостью. Форма отпечатков, полученных с помощью индентора в виде пирамиды, зависит от механических свойств металла и отражает способность металла к упрочнению [4]. При этом на отпечатках всегда наблюдается отличие их проекций от квадратных. Проекция имеет вогнутые или выпуклые стороны.

Образование формы отпечатка при определении твердости по Виккерсу происходит следующим образом. Высота волны и положение ее гребня определяются величиной пластически деформированного объема металла вокруг отпечатка [3, с. 95]. Если пластическая деформация охватывает большой объем металла, то волна образуется плоской, и ее гребень удален от отпечатка. Если пластическая деформация охватывает небольшой объем металла, то высота гребня волны образуется большой, и он находится вблизи краев отпечатка. Если металл имеет большую пластичность (металл проявляет ползучесть), т.е. склонен к упрочнению, то пластическая деформация при определении твердости распространяется на большой объем и волна имеет большой диаметр и небольшую высоту  $h$  [4]. Распределение напряжений и деформаций в середине стороны достигает максимальных значений. Так как металл склонен к упрочнению, пластическая деформация способствует повышению сопротивления деформированию и росту упрочнения, которое сопровождается повышением упругих свойств металла. После снятия нагрузки отпечаток упруго восстанавливается (см. рис. 1, 2). Восстановление из-за повышенной упругой энергии намного значительнее, чем в случае металла, мало склонного к упрочнению. Предел текучести деформированного металла превышает предел текучести недеформированного металла, поэтому упругое восстановление по величине больше, чем пластическая деформация недеформированного металла. В связи с максимальными напряжениями в середине стороны (в точке  $K$ ) восстановление здесь больше, чем у краев (в точках  $A$  и  $D$ ). Поэтому получается отпечаток с вогнутыми сторонами (см. рис. 1, 2). Если волна вокруг отпечатка относительно плоская и гребни четырех его волн отстоят далеко от сторон отпечатка, то проекция отпечатка имеет вогнутые стороны.

Для металла, мало склонного к упрочнению, под нагрузкой отпечаток имеет контур квадрата с равными сторонами (см. рис. 2). После снятия нагрузки происходит упругое восстановление отпечатка. Так как в середине стороны отпечатка остаточная деформация больше, чем в крайних точках, то при восстановлении отпечатка распределение металла около его сторон имеет сферическую форму. В результате форма отпечатка выпуклая. Чем меньше пластичность металла, тем меньший его объем вокруг индентора испытывает пластическую деформацию. Поэтому волна имеет небольшой диаметр и большую высоту [4]. Если гребни волн близки или примыкают к сторонам отпечатков, то проекция отпечатка имеет выпуклые стороны.

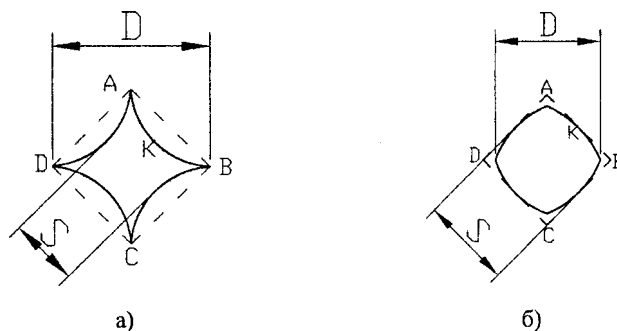


Рис. 1. Форма пирамидального отпечатка до и после приложения нагрузки для металла, склонного к упрочнению (а) и малосклонного к упрочнению (б):

$D$  - диагональ отпечатка, мм;  $S$  - ширина отпечатка, мм;  
 $A, B, C, D$  - края отпечатка;  $K$  - середина стороны отпечатка

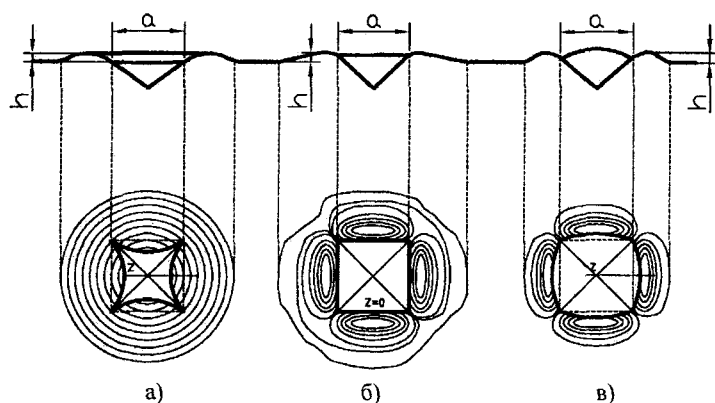


Рис. 2. Три типа отпечатков, получаемых при определении твердости индентором в форме пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$  на отожженных (а), отпущенных после закалки (б) и наклепанных (в) металлах [3]

Нами разработана методика неразрушающего определения основных характеристик механических свойств металла ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_s$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ) по результатам анализа параметра отпечатков и оценки характера пластической деформации поверхности объекта при квазистатическом внедрении индентора при определении твердости по Виккерсу. Проведена отработка, проверка работоспособности и подтверждена возможность применения разработанной методики косвенного определения механических свойств материала (в первую очередь, ударной вязкости) неразрушающим способом на основании оценки характера пластической деформации поверхности объекта при квазистатическом внедрении индентора (при определении твердости по методу Виккерса) на реальных деталях (проведено исследование металла восстановленных штоков компрессоров и пружин предохранительных клапанов с использованием элементов разработанной методики).

Работы, выполняемые в рамках данной темы, являются актуальными, в первую очередь, из-за возможности проведения более точной оценки фактического технического состояния стальных конструкций и оборудования (неразрушающими и малообразцовыми методами), что позволит предотвратить возникновение ряда аварийных ситуаций и повысить надежность и безопасность любого промышленного объекта (в первую очередь, предприятий концерна «Белнефтехим»).

### Выводы

1. Ранее установлено, что метод определения твердости имеет преимущества по сравнению с другими методами диагностики металла оборудования и конструкций в связи с наличием у него устойчивой корреляции измеряемых параметров с физико-механическими характеристиками и структурным состоянием металла.

2. Проведенные исследования свидетельствуют о возможности широкого использования метода твердости для получения стандартных механических характеристик:

- метод твердости является незаменимым при оценке механических свойств металлов в процессе эксплуатации; для металлов, из которых трудно изготовить образцы резанием; при оценке свойств поверхностного слоя; при аварийных исследованиях и разработке новых сплавов на лабораторных плавках, когда не представляется возможным вырезать образцы для испытаний; при необходимости стопроцентного контроля качества металла изделий и т.д.;

- вследствие простоты, дешевизны и возможности определения механических свойств непосредственно на изделиях без их разрушения этот метод имеет большое значение для нефтехимической промышленности.

3. Проведен аналитический обзор методов определения твердости материалов, применяемых при работе с различными деталями общего и нефтехимического машиностроения (методы Бринелля, Роквелла, Виккерса). Разработаны критерии оценки указанных способов:

- с позиции универсальности метода (с целью необходимости объективного применения для работы с деталями различных размеров, формы, химического состава, твердости и т.п.) — наиболее универсальным является метод определения твердости по Виккерсу, так как твердость по Виккерсу не зависит от нагрузки, а получаемые отпечатки имеют геометрическое подобие;

- с позиции максимальной чувствительности метода, а именно, - чувствительности характера и размерных параметров пластической деформации материала детали вокруг индентора к изменению механических свойств и структуры диагностируемого материала (с целью использования выбранного наилучшего метода для косвенной оценки механических свойств материала контролируемой детали или

конструкции) - наиболее чувствительным методом к изменению основных механических свойств (прочности и пластичности) и структуры материала является метод определения твердости по Виккерсу.

4. Вследствие того, что твердость по Виккерсу является наиболее чувствительной характеристикой структурно-фазового состояния металла, определение твердости данным методом является не только методом оценки прочностного состояния металла, но и наиболее чувствительным методом контроля структурно-фазового состояния металла. Следовательно, при необходимости работы с микро- и макротвердостью целесообразно работать именно с данным методом и микротвердостью.

5. Установлено, что форма проекций отпечатков позволяет судить о способности материала воспринимать пластическую деформацию, т.е. характеризует пластичность материала. Форма изогнутости сторон отпечатка свидетельствует о способности металла воспринимать пластическую деформацию и изменяется так же, как относительное удлинение и сужение.

6. На основании обобщения результатов установлен наилучший метод определения физико-механических характеристик стали за счет оценки характера пластической деформации поверхности объекта при квазистатическом внедрении в материал индентора - это оценка параметров отпечатка и характера пластической деформации при внедрении в материал четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$  при определении твердости по методу Виккерса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Марковец М.П. Определение механических свойств металла по твердости. - М.: Машиностроение, 1979. - 191 с.
2. Дьяков В.Г. Легированные стали для нефтехимического оборудования. - М: Машиностроение, 1971.- 183 с.
3. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. - М.: Наука, 1976. - 230 с.
4. Григорович В.К. Оценка способности металлов к наклепу по форме отпечатков, полученных при измерении их твердости пирамидальным наконечником // Заводская лаборатория. - 1950. - № 8, Т. 16. - С. 980-983.