

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178.15/179.119:539.4

О резервах повышения достоверности методов определения твердости материалов

А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, В. П. Швец

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Кратко рассмотрены процессы, сопутствующие внедрению индентора в упругоэластическое тело при испытаниях материалов на твердость. Анализируются причины, способствующие снижению достоверности получаемых результатов, в том числе трения контактирующих поверхностей. Предложен способ оценки эффективности применения различных смазочных материалов для соответствующего приборного обеспечения. Обсуждаются полученные экспериментальные результаты и некоторые концепции по повышению достоверности метода твердости.

Ключевые слова: измерение твердости, внедрение индентора, трение на поверхности контакта, смазочные материалы.

Введение. Современная механика деформируемого твердого тела оперирует большим набором характеристик физико-механических свойств материалов, используемых при решении многих краевых задач и расчетах конструкций на прочность по различным критериям. Многие из этих характеристик используются как эталонные, достоверное определение которых требует изготовления специального оборудования и создания сложных, часто очень дорогих средств испытания, обеспечивающих заданные условия нагружения, систем управления, регистрации и обработки массива полученных экспериментальных данных. В этих условиях большое практическое значение приобретает совершенствование сравнительно доступных и удобных в эксплуатации экспресс-методов оценки качества материалов в исходном состоянии или при наработке в составе действующих конструкций.

Среди отработанных методов определения большого количества характеристик механических свойств особое место занимает метод твердости, позволяющий при соблюдении необходимых условий оперативно, без разрушения образца, определять параметры, комплексно отражающие основные свойства материала, и, более того, по соответствующим корреляционным уравнениям рассчитывать характеристики многих механических свойств, в частности упругости, прочности, деформационной способности, вязкости разрушения, гомогенности материала и др.

В настоящее время созданы и применяются на практике около 30 методов определения статической и динамической твердости вдавливанием и цара-

панием. Наиболее распространены методы Бринелля, Роквелла и Виккерса, основанные на вдавливании в поверхность испытываемого образца материала соответственно стального шарика, алмазного конуса с углом при вершине 120° и алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° . Эти методы подробно описаны в работах [1–3 и др.]. Оптимальные процедуры их реализации регламентированы государственными стандартами. Тем не менее вскрытие новых резервов повышения достоверности определения характеристик твердости различных материалов по-прежнему остается чрезвычайно важной и актуальной задачей механики материалов.

Механика внедрения индентора. При рассмотрении вопросов, касающихся этой проблемы, необходимо, прежде всего, иметь четкое представление о специфике процессов, протекающих при внедрении индентора в деформируемое тело. Детальное обсуждение вопросов выходит за рамки статьи. Поэтому ограничимся сначала анализом наиболее важных элементов взаимодействия согласованных поверхностей контактирующих тел на примере внедрения сферического индентора (метод Бринелля), как наиболее простого и широко используемого на практике в течение более 100 лет.

При внедрении стального шарика в упругопластическую среду к вершине индентора примыкает зона сцепления, что предопределяет отсутствие в этой области тангенциальных смещений, т.е. создаются условия плоской деформации материала и, как следствие, его объемного сжатия. В зоне проскальзывания, находящейся в периферийной области сферического контакта, реализуется процесс трения, сопровождающийся диссипацией энергии. Вследствие сдвигов в этой зоне и деформаций приповерхностных слоев происходит внедрение индентора. Интенсивность процессов увеличивается к периферии. С ростом нагрузки граница между зонами сцепления и проскальзывания расширяется.

В условиях осесимметричного контакта давление ориентировано в радиальном направлении. Размер c зоны сцепления зависит от коэффициента трения f и относительной податливости контактируемых тел. В отдельных случаях, особенно при внедрении жесткого индентора в податливую упругопластическую среду, влияние трения оказывается существенным. При этом уже при $f = 0,3$ размер зоны сцепления может достигать порядка 70% размера a зоны проскальзывания [4].

Действующие в этой области силы трения способствуют расширению зоны сцепления, увеличивают растягивающие напряжения на поверхности более жесткого тела и снижают их на поверхности более податливого [5, 6], что подтверждено экспериментально при вдавливании стальных сфер в стеклянные пластины [7], а также опытами В. В. Петрова и Ю. В. Сохача, выполненными под руководством В. И. Моссаковского. В то же время известно, что при взаимодействии тел из материалов с одинаковыми физико-механическими свойствами указанные эффекты проявляются в меньшей мере.

В формировании сил сопротивления внедрению индентора основную роль играют силы трения в зоне проскальзывания, вызывающие в отдельных случаях смещение приповерхностных слоев металла. Немаловажное значение имеют также адгезионные процессы, шероховатость и степень загрязнения поверхностей контактирующих тел, что приводит к увеличению диссипатив-

ных потерь, росту на периферии поверхности контакта растягивающих напряжений и нелинейности между нагрузкой и перемещением индентора [8]. Адгезионное взаимодействие наиболее часто проявляется при измерениях твердости адгезивно-активных материалов, таких как, например, титан и его сплавы, образующих с материалом индентора устойчивые связи, что способствует росту “заторможенного” слоя, повышающего сопротивление внедрению индентора. Кроме того, в обычных условиях причиной изменения ситуации в зоне контакта могут быть адсорбционные и оксидные пленки, которые в процессе трения быстро разрушаются и также быстро восстанавливаются.

Часть работы, которую совершает вдавливаемое тело, компенсирует потери, связанные со структурными трансформациями в материале, в том числе образование новых поверхностей (трещин) в зоне процесса. Эти потери могут составлять существенную долю общих энергетических потерь.

Отмеченные выше механические, физические и химические процессы в большей или меньшей мере проявляются при внедрении инденторов любой формы: сферических, призматических, конических и др. Это значительно осложняет построение адекватных моделей, описывающих механику взаимодействия контактируемых элементов. Поэтому задача о внедрении индентора произвольного профиля в деформируемое тело пока не имеет, по крайней мере, аналитического решения даже в упругой постановке. Известные из литературных источников расчетные схемы базируются на не всегда обоснованных допущениях. Предполагают, в частности, что давление на индентор уравнивается силами сопротивления материала деформированию, пренебрегая при этом всегда присутствующей в зоне контакта силой трения, которая вносит, как было показано выше, наиболее существенный вклад в общее сопротивление внедрению.

По данным имеющихся оценок [1, 2, 6, 7, 9 и др.] доля фрикционных потерь при внедрении индентора колеблется в достаточно широких пределах и может составлять в энергетических единицах 5...10% и более общей работы, затрачиваемой на внедрение. Об этом свидетельствуют и результаты единичных расчетных работ, выполненных численными методами [10].

Формированию мнения о незначительном влиянии трения на сопротивление вдавливанию способствовали результаты Р. Хилла [11], которые можно считать оправданными только при малых глубинах внедрения.

Таким образом, широко распространенное в настоящее время среди специалистов мнение о пренебрежимо малом влиянии трения на сопротивление внедрению индентора никем не доказано и сложилось, очевидно, потому, что аналитические решения краевых задач с учетом трения применительно к условиям работы индентора (упругопластическая постановка, малые объемы задействованного материала, трудно моделируемые начальные условия, физическая и геометрическая нелинейность и др.) практически отсутствуют ввиду их сложности даже в постановочном плане, а имеющиеся алгоритмы численных решений в связи с неординарной ситуацией в зоне контакта также основаны на допущениях, исключающих получение адекватных результатов.

В не менее сложных условиях находятся и экспериментаторы, так как полностью исключить трение в опытах на вдавливание индентора практи-

чески невозможно, а хотя бы понизить его влияние, используя смазку, также сложно и малоэффективно, поскольку подвести ее в зону сопряжения поверхностей контактируемых тел при высоком уровне давления между телами очень трудно.

Обоснование методики испытаний. Учитывая актуальность работ, касающихся повышения точности определения твердости материалов, особенно повышения физической достоверности широко используемых на практике рекомендованных в литературных источниках [1, 12–14 и др.] корреляционных связей между значениями твердости и другими характеристиками механических свойств материалов, авторы провели на материалах различной природы самостоятельное исследование степени влияния трения разными методами.

Сопоставление возможных вариантов решения этой сложной задачи и результаты их апробаций показывают, что наиболее информативным и приемлемым в реализации является метод двукратного непрерывного нагружения материала индентором, строго ориентированным на внедрение в одно и то же место.

Для успешной реализации этой программы необходим прибор с очень высокой точностью обеспечения и контроля прилагаемых к индентору усилий и регистрации его перемещений.

На основании анализа достоверности чисел твердости, определяемых на стационарных и переносных отечественных твердомерах разных марок, достоинств и недостатков последних в сопоставлении с аналогичными приборами ряда зарубежных фирм для проведения собственных исследований был выбран твердомер COMPUTEST SC швейцарской фирмы ERNST, отличительной особенностью которого является высокий уровень автоматизации процесса испытаний, обеспечивающей накопление, систематизацию и обработку экспериментальных данных с выводом результатов на дисплей в единицах Бринелля, Виккерса и Роквелла по шкалам А, В и С. Это исключает влияние субъективных факторов и значительно сокращает время измерений.

Расширению возможностей прибора способствовало использование новой, защищенной патентом, системы измерения с высокой точностью глубины невозстановленного отпечатка, что исключает влияние упругости материала индентора на регистрируемые показатели исследуемого материала. Оригинальна и принятая форма геометрии алмазного конического индентора, отличающаяся от многих общепринятых углом при вершине 110° и наличием плоского среза (диаметр 0,06 мм) вершины, ориентированного строго ортогонально к оси конуса (рис. 1). Благодаря плоскому дню в самом начале вдавливания в зону процесса вовлекается большое количество элементов структуры, включая блоки мозаики и пачки скольжения, что способствует получению интегральной характеристики макротвердости поликристаллического или даже гетерогенного материала.

В отличие от большинства известных методов испытаний по схеме Роквелла (двухступенчатое нагружение), на приборе COMPUTEST SC внедрение индентора осуществляется при одноразовом активном нагружении до максимального давления 49 Н с последующей выдержкой при этой нагрузке в течение 3 с.

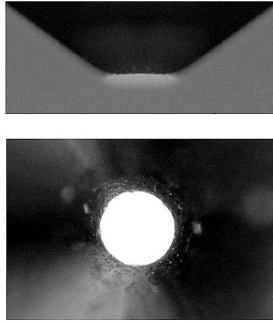


Рис. 1. Рабочая часть конического индентора твердомера COMPUTEST SC.

Использование в приборе алмазного индентора указанной геометрии в сочетании с предложенной методикой испытаний обеспечивает получение стабильных результатов, что свидетельствует об оптимальности принятых в конструкции решений. Действительно, уменьшение угла при вершине приводит к росту рассеяния регистрируемых параметров и опасности выкрашивания индентора. При больших углах возникает необходимость увеличения усилия вдавливания, что приводит к росту погрешностей регистрируемых значений твердости в связи с повышением сил трения в зоне контактирующих поверхностей и, как следствие, к нарушению закона подобия – одного из основных условий получения достоверных чисел твердости при инденторах любой формы.

Результаты, полученные М. С. Дроздом и Ю. И. Славским [1] с целью проверки закона подобия при статическом вдавливании конуса с разными углами при вершине, показывают (рис. 2), что при $\varphi = 120...136^\circ$ независимо от нагрузки числа твердости наиболее стабильны и близки к соответствующим значениям твердости по Виккерсу. Показатели твердости при инденторе с меньшим углом при вершине для материалов с высокой твердостью ($HV \geq 350$) более низкие, что авторы объясняют влиянием трения.

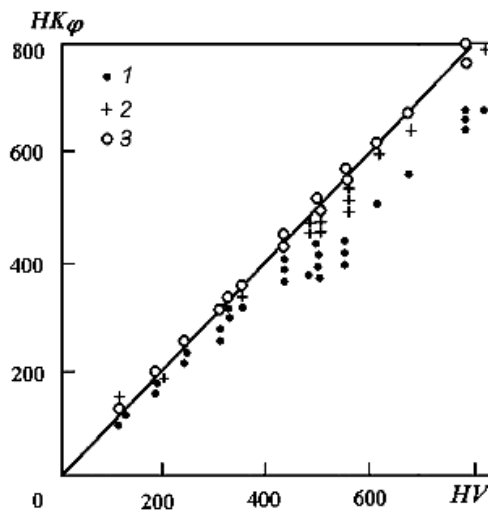


Рис. 2. Соотношение между твердостью при вдавливании пирамиды Виккерса и конуса с углами при вершинах 90 (1), 120 (2) и 136° (3) [1].

На рис. 3 приведены результаты, полученные теми же авторами при обработке результатов испытаний 12 сталей различной твердости при изучении влияния также угла при вершине конуса на отношение HV/HK_φ (HK_φ – твердость материала при угле φ конуса). Видно, что у сталей с низкой твердостью ($HV \leq 320$) при изменении φ от 30 до 170° твердость плавно возрастает (кривая 1), у сталей с большой твердостью ($HV \geq 920$) при $\varphi = 90 \dots 140^\circ$ кривая 2 отклоняется в сторону меньших значений φ , причем при $\varphi = 110^\circ$ ордината луча 2 мало отличается от единицы. Авторы [1] указанное раздвоение кривой HV/HK_φ при низких значениях твердости материала также связывают с ростом сил трения и нарушением закона подобия.

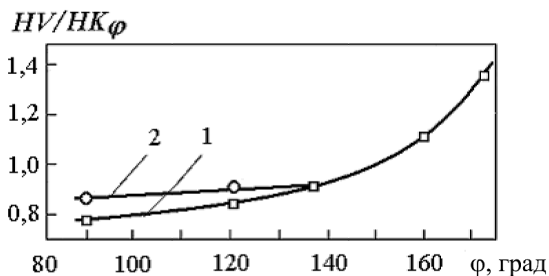


Рис. 3. Зависимость отношения HV/HK_φ от угла при вершине конуса (по результатам испытаний сталей различной твердости): 1 – $HV \leq 320$; 2 – $HV > 320$.

Описанные выше результаты свидетельствуют о том, что использование индентора с углом при вершине 110° (в приборах Роквелла угол составляет 120°) является вполне допустимым и, более того, при наличии плоского среза (рис. 1) – вполне оправданным. Срез, незначительно увеличивая силу вдавливания, приближает динамику процесса нагружения к условиям при испытаниях по Роквеллу, когда внедряется индентор с большим углом, но с закругленной вершиной ($r = 0,2$ мм), что, по мнению некоторых авторов, обеспечивает относительную равномерность распределения давления на поверхности контакта.

Представляется, что срез вершины индентора играет положительную роль в формировании зоны сцепления, создавая в самом начале внедрения область объемного сжатия, стабилизирующую дальнейшее развитие процесса деформирования в указанной зоне, подобно тому как это происходит при вдавливании цилиндра с плоским торцом (задача Герца). Наличие среза способствует стабилизации деформирования испытываемого материала, сохранению подобия напряженно-деформированного состояния при дальнейшем нагружении, делает процесс менее чувствительным к степени гетерогенности материала и расширению возможностей прибора. В этом отношении показателен известный факт плохой корреляции чисел твердости, полученных стандартными методами, с характеристиками прочности материалов с высокой степенью гетерогенности структуры.

Таким образом, новые оригинальные решения, как показывает проведенный анализ, дают возможность при обеспечении высокой точности реализовать на приборе COMPUTEST SC программу двукратного нагружения, первое приближение которой можно представить в следующем виде.

Нагружение при первом испытании осуществляется до заданного уровня нагрузки по режиму обычных испытаний на используемом твердомере (нагружение – выдержка под нагрузкой – разгрузка), повторное – по строго тому же режиму, но после обработки индентора и лунки, образовавшейся при первом нагружении, соответствующей смазкой. По результатам сопоставления глубин погружения индентора при первом и втором нагружениях судят о степени снижения трения за счет влияния смазки.

С целью уточнения последовательности выполнения отдельных операций при проведении испытаний и оптимизации методологии реализации программы испытаний в целом следует предварительно более подробно рассмотреть кинетику напряженно-деформированного состояния металла на основе научно обоснованной методологии, проанализировать влияние факторов, сопутствующих внедрению индентора, провести разгрузку и повторное нагружение, в том числе при наличии смазочного материала в зоне контакта и без него.

Механическую сторону процесса внедрения индентора с достаточной для решения инженерных задач строгостью можно представить в следующем виде.

По мере углубления индентора в упругопластическое пространство давление на поверхности контакта становится близким к равномерному. Часть объема деформирующейся лунки смещается в радиальном направлении за счет упругих деформаций окружающей среды. Часть материала сначала выпучивается, образуя по краям валик. При больших деформациях может происходить обратное смещение материала в направлении движения индентора, уменьшая при этом размеры валика до уровня поверхности образца и, более того, образуя иногда вокруг индентора вмятину по форме его сечения. Это характерно для малоупрочняющихся материалов при больших деформациях, приводящих к смещению пластической зоны в глубь тела.

Описать сложные трансформации напряженно-деформированного состояния материала в зоне контакта очень сложно. Поэтому краевая задача для этой зоны решалась только при определенных допущениях. Тем не менее результаты некоторых численных решений качественно совпадают с опытными данными, полученными оптическими методами и по искажениям сетки [7]. Из этих наблюдений следует, что при внедрении тупых инденторов, к которым относится и рассматриваемый, поверхности равных деформаций материала под индентором можно моделировать сферой как результат преимущественно радиальных смещений, образующих полусферическую область, где все направления практически равны и имеют радиальную симметрию.

Эта модель, достаточно точно отражающая ситуацию в зоне контакта, использована Хиллом [12] для пластичных материалов, а впоследствии успешно распространена на другие среды. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными, полученными, например, при испытаниях упругопластических материалов.

Процесс нагружения заканчивается выдержкой при максимальной нагрузке (49 Н), приложенной к индентору. При использовании прибора описанной выше конструкции этого времени достаточно, чтобы индентор в результате релаксации напряжений и ползучести материала углубился на некоторую дополнительную глубину. По данным авторов при испытаниях малолегиро-

ванных и легированных сталей увеличение глубины лунки за 3 с составляет около одного микрона, т.е. соизмеримо с высотой микронеровностей испытуемого материала, допустимой при измерениях прибором COMPUTEST SC ($Ra \leq 1$ мкм). В процессе разгрузки поверхность лунки становится свободной от напряжений, а остаточные напряжения – самоуравновешенными. При этом поверхностные слои лунки в радиальном направлении подвержены сжатию, в окружном – растяжению. Перераспределение напряжений сопровождается сдвигом зоны максимальных значений давления на периферийные участки контакта. Происходят относительные перемещения элементов структуры, приводящие к механическому гистерезису и остаточным напряжениям. Повторное нагружение, как показывают расчеты с использованием модели с полусферическим ядром, даже при наличии полусухого трения является практически чисто упругим [7]. Если поверхности индентора и образовавшуюся при первом нагружении лунку перед повторным нагружением покрыть смазочным материалом, сопротивление внедрению индентора уменьшается, а глубина его внедрения увеличивается по сравнению с глубиной при испытаниях без смазки.

Предлагаемая методика двукратного нагружения позволяет экспериментально установить степень влияния на сопротивление внедрению индентора перехода от полусухого режима трения к полужидкостному, не исключая трение полностью. Это дает возможность провести качественную и частично количественную оценку проявления изучаемого эффекта, обосновать рекомендации по выбору смазочных материалов и других средств снижения контактного трения в системе индентор–деформируемая среда, а также повысить достоверность определения твердости как важнейшей характеристики материала, уточнить параметры, связывающие твердость с другими физико-механическими свойствами различных материалов.

Методика включает следующие этапы ее реализации по двум программам испытаний.

Испытания по первой программе:

подготовка поверхности и нагружение индентором с выдержкой при максимальном давлении (49 Н) в течение 3 с; регистрация глубины невосстановленной лунки;

полная разгрузка с освобождением поверхностей индентора и образовавшейся лунки;

выдержка системы в ненагруженном состоянии в течение 10 с, во время которой поверхность индентора и лунки покрывается смазочным материалом;

повторное нагружение и разгрузка с точным повторением режима по нагрузке и времени, регистрация глубины невосстановленной лунки.

Испытания по второй программе:

содержит все перечисленные выше этапы, включая режим и временные интервалы, т.е. полностью повторяет все этапы первой программы, кроме операции смазки индентора и лунки перед повторным нагружением, которая при испытаниях по второй программе исключается.

Таким образом, режим повторного нагружения при испытаниях по первой программе реализуется в условиях полужидкостного трения соприкасающихся поверхностей, по второй программе – в условиях полусухого трения.

Различие в глубине внедрения индентора при повторных испытаниях по первой и второй программам является параметром, по которому можно судить о степени влияния трения на результаты проводимых измерений при внедрении конического индентора.

При выполнении программ испытаний следует особое внимание обратить на необходимость определения глубины внедрения индентора с высокой точностью, повышению которой способствует использование в качестве измерений размера (глубины) невосстановленного отпечатка (лунки), что позволяет исключить влияние упругих деформаций испытываемого материала.

Результаты исследования. Описанная выше методика двойного нагружения была использована при испытаниях на приборе COMPUTEST SC конструкционных материалов разных классов, имеющих сильно отличающиеся физико-механические свойства: коррозионно-устойчивая высокопрочная сталь 0Н9; хромоникелевая нержавеющая сталь 12Х18Н10Т; низкоуглеродистая сталь 10 и алюминиевый сплав АМцС.

Для успешной реализации указанной методики очень важно выбрать наиболее подходящие смазочные материалы, способные создавать на поверхности контакта прочную пленку, обладающую хорошим прилипанием и легко удаляемую после испытаний. Они должны быть достаточно стабильными при высоких давлениях и иметь оптимальную для заданных условий вязкость. Поэтому в качестве таких материалов использованы широко применяемые в общем машиностроении жидкие смазки: индустриальное (И20); касторовое и силиконовое масла, а также для сравнения смазка животного происхождения – смалец, который хорошо зарекомендовал себя при использовании для торцевых поверхностей образцов при механических испытаниях на одноосное сжатие. В комплексе с разными по природе и структурному состоянию испытываемыми материалами это позволило создать в зоне соприкасающихся поверхностей различные вариации условий контактного трения.

В таблице представлены средние из полученных в пяти опытах значений глубины h'_2 повторного внедрения индентора в исследуемые стали и алюминиевый сплав по описанной выше программе, но без смазки, а также глубин h''_2 внедрения при наличии четырех видов смазки. Там же приведены данные об увеличении глубины внедрения за счет смазки контактирующих поверхностей индентора и лунки. Эти результаты показаны также на рис. 4 в виде гистограмм и на рис. 5 – в виде зависимостей параметра $\alpha = (h'_2 - h''_2)/h'_2$, характеризующего эффективность разных смазок, от глубины h'_2 внедрения индентора, т.е. от величины, обратно пропорциональной (с точностью до коэффициента) показателю твердости материала при испытаниях без смазки. Видно, что наиболее слабо эффект от смазки проявляется при испытаниях малоуглеродистой стали (2,2...4,4%), более сильно – хромоникелевой (3,7...5,1%) и высокопрочной (3,6...5,8%). При этом самой эффективной для этих сталей оказалась смазка животного происхождения.

При внедрении индентора в алюминиевый сплав применение смазки приводит к заметному увеличению (на 6,4...7,4%) регистрируемых чисел твердости, причем эффективность использованных смазок практически одинакова. В то же время у сталей прослеживается устойчивое повышение эффективности смазки при переходе от индустриального масла (2,2...3,6%) к

Влияние различных смазочных материалов в оценке параметром α

Материал	h_1 , мкм	h_2 , мкм	h_2' , мкм	Масло смазочное	α , %
Сплав АМцС	77,2	79,9	85,1	Индустриальное И20	7,1
			85,8	Касторовое	7,4
			85,0	Силиконовое	6,4
			85,5	Животное	6,6
Сталь 10	39,1	49,8	50,9	Индустриальное И20	2,2
			51,4	Касторовое	3,2
			51,5	Силиконовое	3,4
			52,2	Животное	4,4
Сталь 12Х18Н10Т	26,5	27,3	28,3	Индустриальное И20	3,7
			28,4	Касторовое	3,9
			28,4	Силиконовое	4,0
			28,7	Животное	5,1
Сталь 0Н9	21,6	22,3	23,1	Индустриальное И20	3,6
			23,4	Касторовое	4,0
			23,4	Силиконовое	4,0
			23,6	Животное	5,8

Примечание. Глубина лунки h_1 – нагружение без смазки; h_2 – повторное нагружение без смазки; h_2' – повторное нагружение со смазкой.

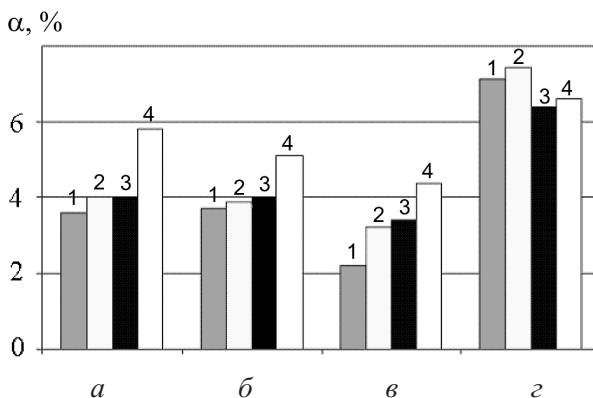


Рис. 4. Отношение глубины повторного внедрения индентора в полупространство при испытаниях на твердость сталей 0Н9 (а), 12Х18Н10Т (б), 10 (в) и сплава АМцС (г) при смазке индустриальным И20 (1), касторовым (2), силиконовым (3) и животным (4) маслами к глубине повторного внедрения без смазки (в %).

животному (4,4...5,8%) и некоторая тенденция ее роста с увеличением твердости (уменьшением h_2' , рис. 5).

Из приведенных данных видно, что применение смазочных материалов при испытаниях по разработанной методике позволяет существенно повысить точность измерения твердости за счет снижения влияния трения в зонах контакта при внедрении индентора. Однако параметры, характеризующие

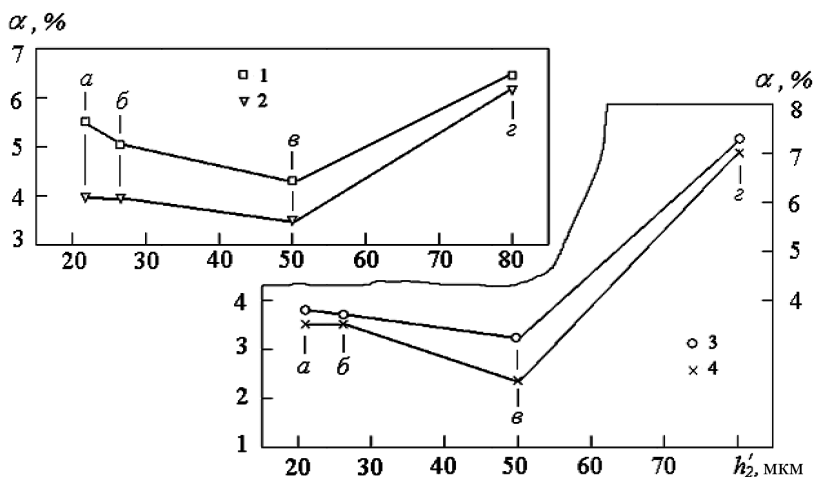


Рис. 5. Зависимость параметра α от глубины лунки. (Обозначения те же, что и на рис. 4).

степень этого влияния, не всегда однозначны. Их влияние может зависеть от принятой методологии испытаний, качества ее реализации и особенностей используемого приборного обеспечения.

Рассмотренный метод повторного индентирования, естественно, не позволяет исключить трение полностью, тем не менее дает возможность провести не только качественные, но и количественные оценки его влияния на регистрируемые при испытаниях числа твердости, а, при необходимости, внести соответствующие коррективы в алгоритмы расчета.

Заключение. Краткий анализ исследований, связанных с развитием и расширением сфер использования метода твердости при решении задач механики материалов и других технических приложений, показывает, что в настоящее время основное внимание специалистов в этой области сосредоточено на повышении достоверности корреляций чисел твердости с характеристиками других свойств материалов. К сожалению, в большинстве работ, относящихся к развитию и уточнениям физических представлений о кинетике процесса внедрения индентора, уделяется очень мало внимания изучению и научному обоснованию хотя бы моделей физических явлений, сопутствующих взаимовнедрению деформируемых тел. Последние работы относятся к уточнению уже существующих представлений, сложившихся еще в прошлом веке, о чем свидетельствуют годы публикаций большинства источников. В связи с этим описанные в литературе и рекомендуемые для использования в расчетах ведомственными нормами и государственными стандартами корреляционные соотношения не обоснованы физически, а получены, как правило, путем обработки массива экспериментальных данных и поэтому постоянно по мере накопления этого массива уточняются. Большинство предложенных корреляций ограничено кругом материалов одного класса. Так, для определения по твердости пределов текучести и прочности только сталей предложено более 20 уравнений с разными коэффициентами корреляций. Некоторые из уравнений включают дополнительные параметры, определение которых требует постановки специальных опытов. Аналогичная ситуация существует и с другими характеристиками материалов.

Твердость сама по себе является уникальной характеристикой, объединяющей целый комплекс физических, в том числе энтропии [15], и механических свойств твердых тел, включая вязкость разрушения [16]. Поэтому ее можно считать интегральным параметром, на который часто ориентируются при выборе и оценке качества материалов для конструкций.

При таких широких возможностях этой характеристики чрезвычайно важно совершенствование методологии ее определения и обработки опытных данных. Как показали результаты специальных исследований [17], на регистрируемые прибором числа твердости влияет степень напряженности и вид напряженного состояния, что особенно важно учитывать при измерениях на работающем оборудовании для оценки состояния материала несущих элементов в процессе наработки. Представляется, что к одному из эффективных путей повышения точности измерений относится, как показано выше, разработка способов оценки и учета диссипативных потерь при внедрении индентора, в первую очередь связанных с влиянием трения, наличие которого всегда приводит к завышению регистрируемых при испытаниях чисел твердости. Реализовать этот путь непросто, так как степень диссипации энергии в связи с трением может изменяться в широких пределах в зависимости от свойств контактируемых материалов, формы индентора, режима нагружения и других факторов. Поэтому получаемые при заданных условиях испытания значения твердости в ответственных случаях необходимо корректировать, внося необходимые поправки, определяемые по результатам дополнительных испытаний, общие принципы реализации которых описаны в настоящей работе.

В связи с отмеченными выше методическими сложностями следует осторожно подходить к оценке возможностей метода твердости. Так, например, говоря о необходимости обеспечения при испытаниях закона подобия, необходимо иметь в виду, что причиной его нарушения, даже при геометрически подобных отпечатках, может быть отсутствие подобия геометрии деформированных объемов и полей напряжений, связанное с изменениями режима контактного трения при переходе от одного вида взаимодействия контактирующих тел к другому [18]. На возможность возникновения такой ситуации обращал внимание еще Н. Н. Давиденков [19].

Необходимо также учитывать природу и структурные особенности испытываемого материала. Так, пределы прочности малопластичных материалов (чугуны, литейные алюминиевые сплавы, отдельные материалы порошковой металлургии, металлокерамические композиты и т.п.) не имеют и вряд ли будут иметь корреляцию с твердостью.

Работу, которую совершает индентор, преодолевая сопротивление деформируемого тела, точно определить практически невозможно, так как процессу внедрения сопутствует ряд трудно учитываемых факторов. В первую очередь это трибологические потери, исключить которые очень трудно, но снизить их до уровня, допустимого в технических расчетах и приложениях, вполне возможно. Здесь кроме вариантов использования различных смазочных материалов одним из эффективных способов может оказаться специальная обработка поверхности индентора, в том числе с применением монокристаллических углеродных покрытий, легированных азотом [20], наноразмерных

пленок [21] и других методов, основанных на применении современных высоких технологий.

Даже частичное решение этих вопросов будет, несомненно, способствовать повышению достоверности и расширению внедрения метода твердости при рассмотрении многих актуальных задач механики материалов и технической диагностики.

Работа выполнена при поддержке гранта 9.5 Программы НАН Украины “Ресурс”.

Резюме

Коротко розглянуто процеси, що супутні прониканню індентора у пружно-пластичне тіло під час випробувань матеріалів на міцність. Аналізуються причини, які призводять до зниження вірогідності отриманих результатів, у тому числі тертя поверхонь, що контактують. Запропоновано спосіб оцінки ефективності використання різних мастильних матеріалів для відповідного приладового забезпечення. Обговорюються отримані експериментальні результати та деякі концепції щодо підвищення вірогідності методу міцності.

1. Гудков А. А., Славский Ю. И. Методы измерения твердости металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 169 с.
2. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
3. Колмаков А. Г., Терентьев В. Ф., Бакиров М. Б. Методы измерения твердости: Справочное издание. – М.: Интермет инжиниринг, 2000. – 128 с.
4. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязоупругости. – М.: Наука, 1980. – 303 с.
5. Моссаковский В. И., Фатиева И. Н. Вдавливание симметричного штампа в упругую полуплоскость при наличии сцепления на линии контакта // Изв. АН СССР. Механика. – 1965. – № 6. – С. 5 – 8.
6. Горячева И. Г., Добычная М. К. Контактные задачи в трибологии. – М.: Машиностроение, 1988. – 254 с.
7. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 506 с.
8. Моссаковский В. И., Бискуп А. Г. Вдавливание при наличии трения и сцепления // Докл. АН СССР. – 1972. – 206, № 5. – С. 1068 – 1070.
9. Иванов П. А. Влияние контактного трения при испытании металлов на твердость // Завод. лаб. – 1962. – 28, № 5. – С. 609 – 611.
10. Бакиров М. Б., Зайцев М. А., Фролов И. В. Математическое моделирование процесса вдавливания сферы в упругопластическое пространство // Там же. – 2001. – № 1. – С. 37 – 46.
11. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: Гостехтеоретиздат, 1956. – 408 с.
12. Матюнин В. М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 214 с.

13. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1973. – 191 с.
14. *Семин А. М.* Определение механических свойств металлов по характеристикам твердости. – М.: Изд-во современного гуманитарного ун-та, 2000. – 153 с.
15. *Комаровский А. А.* Физическая природа твердости // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 1. – С. 41 – 43.
16. *Лебедев А. А., Швец В. П.* Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и разгруженном состояниях // Пробл. прочности. – 2008. – № 3. – С. 29 – 37.
17. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Швец В. П.* Метод оценки вязкости разрушения материала по рассеянию характеристик твердости // Там же. – 2007. – № 6. – С. 5 – 12.
18. *Костецкий Б. М.* Фундаментальные закономерности трения и износа. – Киев: Об-во “Знание” УССР, 1981. – 30 с.
19. *Давиденков Н. Н.* Некоторые проблемы механики материалов. – Л.: Ленингр. газ.-журн. и кн. изд-во, 1943. – 152 с.
20. *Левченко В. А., Буяновский И. А., Игнатьева З. В., Матвеев В. Н.* Нанотехнологии XXI века: Углеродные покрытия, обеспечивающие повышение антифрикционных свойств сталей // Трение и износ. – 2005. – 26, № 1. – С. 53 – 57.
21. *Левченко В. А., Буяновский И. А., Игнатьева З. В., Матвеев В. Н.* Новые материалы, обеспечивающие управление смазочной способностью масел: По материалам Междунар. конф. “Нанотехнологии и их влияние на трение, износ и усталость в машинах” (14–15 дек. 2004) // Трение. Износ. Смазка. (электр. ресурс). – 2006. – 1, № 28. – 7 с.

Поступила 12. 04. 2010