

Влияние анизотропии листовых материалов на точность измерения твердости по Виккерсу

Н. Р. Музыка

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

Проанализированы причины погрешностей метода вдавливания индентора статически приложенной нагрузкой при определении характеристик твердости по Виккерсу. Исследовано влияние анизотропии листовых материалов на точность измерения твердости. Показано, что ориентировка отпечатков относительно осей анизотропии материала должна быть неизменной в процессе испытаний, причем ориентировка отпечатка сторонами предпочтительнее ориентировки отпечатка диагоналями.

Ключевые слова: твердость, субъективные и объективные оценки погрешностей, анизотропия, ориентировка отпечатка.

Введение. Многие несущие конструкции эксплуатируются в экстремальных условиях и поэтому необходимо постоянно контролировать их работоспособность. Одним из методов является контроль по механическим характеристикам материалов, которые удобно определять при испытаниях на твердость [1]. В этом случае не требуется нарушать целостность конструкции и изготавливать образцы; процедура определения некоторых механических характеристик по параметрам твердости стандартизирована [2]. Характеристики твердости используются также для оценки степени поврежденности металла.

В настоящее время в практику широко внедряется новый метод контроля – метод LM-твердости, согласно которому за степень поврежденности металла принимается не абсолютное значение твердости, а параметр рассеяния ее значений при массовых замерах [3, 4]. Из-за чувствительности данного метода ко многим видам трансформации структуры, т.е. деградации материала, к корректности проведения испытаний материала на твердость предъявляются большие требования. Одним из основных методов измерения твердости металлов, наряду с получившими наибольшее распространение методами Роквелла и Бринелля, заключающимися в вдавливании индентора статически приложенной нагрузкой, является метод определения твердости по Виккерсу с помощью алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° [5].

Преимущество метода измерения твердости по Виккерсу по сравнению с вышеуказанными методами – независимость твердости от прикладываемой при испытании нагрузки на индентор. Это весьма существенно при сравнительной оценке поврежденности различных материалов – от твердых до материалов с повышенной пластичностью, когда пластические свойства материала накладывают ограничение на величину нагрузки на индентор и на толщину испытываемого листа. Кроме того, следует также отметить идентичность испытаний в отношении постоянства скорости приложения нагрузки и продолжительности, а также возможность проводить исследования тонких листов пластичных материалов.

Постановка задачи исследования. Специфической особенностью известных методов вдавливания для определения твердости материала является то, что методика выполнения отпечатка и проведения измерений, в том числе на приборе Виккерса, изначально предопределяет наличие ряда неизбежных погрешностей. ГОСТ 2999-75 [5] оговаривает условия получения достоверных результатов. Это – выполнение требований к шероховатости поверхности образца, перпендикулярности, плавности и продолжительности приложения нагрузки к образцу. Кроме того, расхождение между длинами обеих диагоналей одного отпечатка не должно превышать 2% меньшей из них.

Однако на практике при определении твердости упругопластических материалов исследователи, соблюдая требования указанного ГОСТа, сталкиваются с большим разбросом получаемых экспериментальных данных. Анализ причин погрешностей определения твердости материала показал, что кроме приведенных норм ГОСТа следует учитывать две стороны эксперимента: субъективную и объективную. Термин “субъективный” не означает чего-то отрицательного или ошибочного, а свидетельствует лишь о том, что эксперимент осуществляется познающим субъектом. Поскольку к субъективным факторам эксперимента относятся особенности органов чувств человека, воспринимающих информацию, уровень научных знаний, квалификация, способности экспериментатора и т.п., принято считать, что их влияние на точность измерения не поддается анализу [6]. Тем не менее при определении твердости по Виккерсу можно отметить основные причины погрешностей, обусловленные субъективными факторами, на которые исследователю следует обратить внимание. Это прежде всего неточное наведение штрихов окуляра на вершины отпечатка, несовпадение осей, проходящих через вершины отпечатка, с осями сетки окуляра, отсутствие резкости контура отпечатка или сетки окуляра, неправильный выбор нагрузки, прикладываемой к индентору: из-за недостаточного уровня нагрузки получаемый отпечаток имеет небольшие размеры, при высоком ее уровне возможно образование большего наплыва металла вокруг лунки или сквозное прокалывание листа по толщине. Причиной погрешностей является также такой технологический фактор, как плохая механическая подготовка к измерениям поверхности образца: наличие “завалов” поверхности образца после полировки; искривление исследуемой поверхности плоского образца, особенно часто встречающееся у образцов тонколистовых пластичных материалов.

К объективным причинам погрешностей относятся в первую очередь инструментальные погрешности прибора, вызванные износом механической системы приложения нагрузки к индентору или нарушением юстировки оптической системы, недостаточностью освещения и контрастности изображения отпечатка, не обеспечивающих четкую визуализацию кромок отпечатка. Сюда же относятся погрешности, обусловленные необходимостью исследования листового материала малой толщины (менее 1 мм), особенно с повышенными свойствами пластичности, и погрешности алгоритма вычислений. Погрешности, возникающие из-за недостаточной контрастности изображения границы отпечатка, можно уменьшить путем применения дополни-

тельно к штатному освещению отпечатка лампочкой тубуса объектива боковой подсветки непосредственно измеряемой поверхности, при этом источник света следует устанавливать таким образом, чтобы световой поток падал под большим углом на измеряемую поверхность. Это особенно эффективно при проведении испытаний пластичных материалов.

Кроме вышеприведенных источников погрешностей определения твердости существенным является недостаточно полное отражение в известном ГОСТ 2999-75 влияния на точность измерений такой важной механической характеристики, как анизотропия свойств материала. Актуальность проведения исследований по учету анизотропии обусловлена тем, что в большинстве случаев листовые материалы являются анизотропными и различаются между собой мерой проявления анизотропии тех или иных механических свойств. Рассмотрим некоторые аспекты анизотропии листового материала.

Известно, что пластическое деформирование листового изначально изотропного металла или металла со слабо выраженной анизотропией механических свойств приводит к векториальности последних вследствие повышения анизотропии [7, 8]. В этом случае говорят о приобретенной анизотропии, которая зависит от достигнутого напряженного состояния [9]. Применительно к испытаниям материалов на твердость по Виккерсу большое влияние на точность метода оказывает анизотропия пластических и упругих свойств материала, возникающая вследствие пластического деформирования металла, при этом по прочности материал может быть изотропным. Показатели пластичности вдоль и поперек волокон значительно различаются. С повышением степени деформации это различие возрастает, причем в продольном направлении (вдоль волокон) показатели пластичности увеличиваются более интенсивно. В наибольшей мере анизотропия материала проявляется в относительном удлинении по сравнению с другими характеристиками. Деформирование металла приводит к монотонному росту предела упругости в продольном (направление приложения нагрузки) и поперечном направлениях, причем модуль упругости в поперечном направлении увеличивается быстрее [10].

Деформационная анизотропия влияет не только на упругопластические свойства материала, но и на твердость, при этом характеристики твердости на каждой стадии деформирования металла имеют такой же физический смысл, как и характеристики прочности $\sigma_{0,2}$ и σ_B при растяжении [11]. При деформировании листовых поликристаллических материалов твердость металла изменяется в зависимости от направления волокон. Например, для сталей в наклепанном состоянии, у которых наклеп создавался растяжением, твердость в направлении волокон (уколы производили в торец образца) ниже, чем в перпендикулярном направлении [1]. Рост предварительной пластической деформации приводит также к повышению $\sigma_{0,2}$ и σ_B . Так, предел текучести $\sigma_{0,2}$ малоуглеродистой стали увеличивается по всем направлениям вырезки, что приводит к росту анизотропии материала [12]. Аналогичная картина наблюдается при деформировании углеродистых сталей. Например, предварительное деформирование стали 60 с 1,5 до 5,4% приводит к увеличению анизотропии по $\sigma_{0,2}$ в 1,4 раза, по σ_B в 1,8 раза [13].

Таким образом, можно предположить, что анизотропия пластических и упругих свойств материала может стать причиной несоответствия между геометрическими размерами ожидаемого отпечатка, соответствующего профилю индентора, и фактического, получаемого после удаления индентора из зоны укола. Заметим, что возможность получения отпечатков с разницей в длине между двумя диагоналями более 2% оговаривается ГОСТом, но при этом допуск на эту разницу для анизотропных материалов не устанавливается, производителю предлагается самому устанавливать и приводить эту норму в стандарте предприятия или в технических условиях на выпускаемую продукцию.

Влияние анизотропии материала на точность измерений по Виккерсу проявляется через установочные погрешности, связанные с произвольным размещением образца материала на предметном столике измерительного прибора, когда оси отпечатка не совпадают с осями анизотропии материала. Это приводит к изменению геометрии разгруженного отпечатка вследствие его искажения из-за последствий упругих деформаций, максимальное значение которых достигается в направлении осей анизотропии.

Методика и результаты исследования. В работе приведены результаты исследования влияния анизотропии на геометрию и размеры отпечатков при определении твердости листового упругопластического материала – алюминиевого сплава АМгб и материала с повышенной пластичностью Д16АМ. Толщина листов составляла 1,5 мм. С целью обеспечения разной степени деформационной анизотропии металла использовали стандартные образцы для испытания на одноосное растяжение, которые изготавливали в соответствии со стандартами [14, 15]. Каждый образец подвергали кратковременному нагружению до определенной степени деформации согласно диаграмме растяжения.

Отпечатки наносили на образцы на приборе Виккерса по пяти лучам, направления которых ориентированы под углами $\alpha = 0, 30, 45, 60$ и 90° к продольной оси образца, совпадающей с осью прокатки листа и направлением деформирования. Обмер отпечатков выполняли как на приборе Виккерса, так и на инструментальном микроскопе ИМЦ-100. При обработке результатов подсчитывали среднее значение длин обеих диагоналей одного отпечатка, а затем среднее значение длин всех отпечатков, имеющих одно направление. Нагрузка F на индентор составляла 50 Н.

На рис. 1 приведены результаты исследования влияния анизотропии на геометрические размеры отпечатков листовых материалов. Из-за неодинаковых упругой и пластической деформации отпечатка, ориентированного под углом к направлению оси прокатки листа, получены разные длины его диагоналей. Видно, что приобретенная в результате пластического деформирования анизотропия механических свойств металла приводит к изменению конечных размеров восстановленной лунки. Так, с увеличением угла α наклона отпечатка к продольной оси деформирования образца среднее значение длин обеих диагоналей отпечатка d_{cp} увеличивается, достигая максимума при $\alpha = 45^\circ$. С дальнейшим ростом угла α наклона отпечатка d_{cp} уменьшается. На величину d_{cp} оказывает влияние также уровень пластической деформации материала: с ее увеличением значение d_{cp} умень-

шается, а влияние приобретаемой по мере деформирования металла анизотропии, судя по уменьшению кривизны зависимости, усиливается. Аналогичные результаты получены для алюминиевого сплава Д16АМ. Чем больше материал склонен к проявлению анизотропии упругопластических свойств, тем больше величина d_{cp} отпечатка. Анизотропия материала проявляется прежде всего в разной длине диагоналей отпечатка. На рис. 2 представлены зависимости соотношения диагоналей d_1/d_2 отпечатка от угла наклона и уровня деформации. Сравнение данных, приведенных на рис. 1 и 2, показало, что сплав АМг6 более анизотропен, чем сплав Д16АМ.

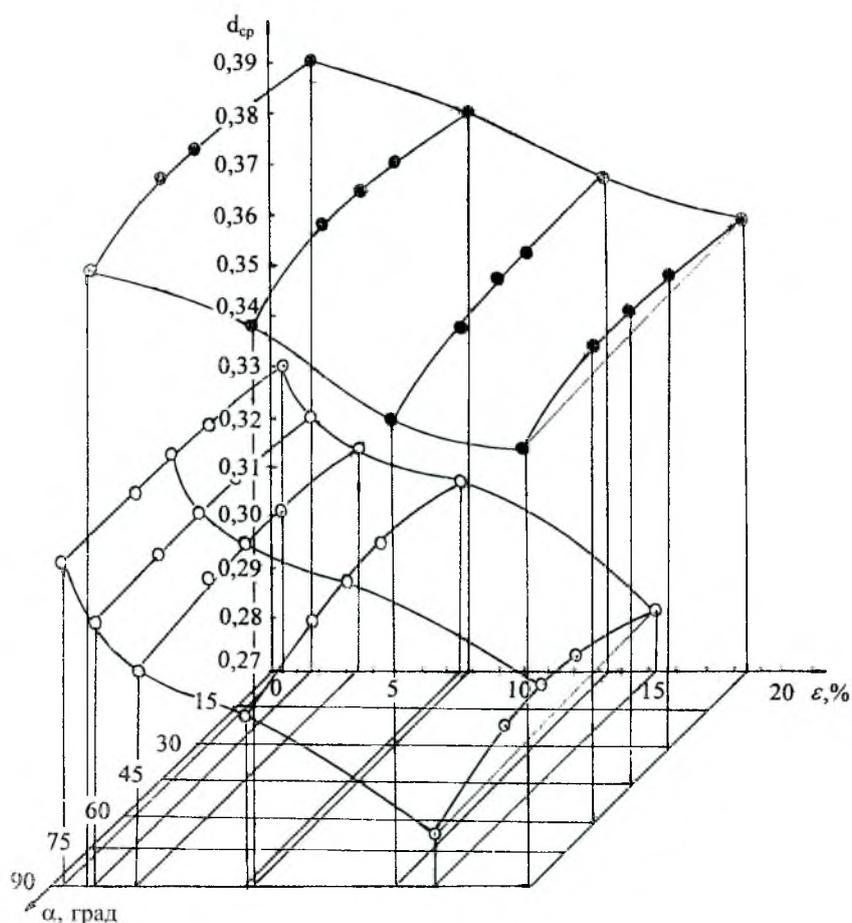


Рис. 1. Диаграмма изменения среднего значения длин диагоналей отпечатка d_{cp} в зависимости от степени анизотропии материалов АМг6 (светлые точки), Д16АМ (темные точки) и уровня деформации.

Анализ результатов исследований по оценке влияния анизотропии металла на геометрию отпечатка позволил сформулировать задачу об оптимальной ориентировке индентора при проведении испытаний. Вопрос о влиянии расположения индентора относительно оси деформирования образца (или осей анизотропии) на величину диагоналей отпечатка, а следовательно, и на значение твердости до настоящего времени не изучался. Его

актуальность обусловлена результатами исследований: для некоторых анизотропных материалов количество отпечатков с разностью между длиной диагоналей более 2% может быть настолько велико, что не позволит корректно определить параметры твердости материала.

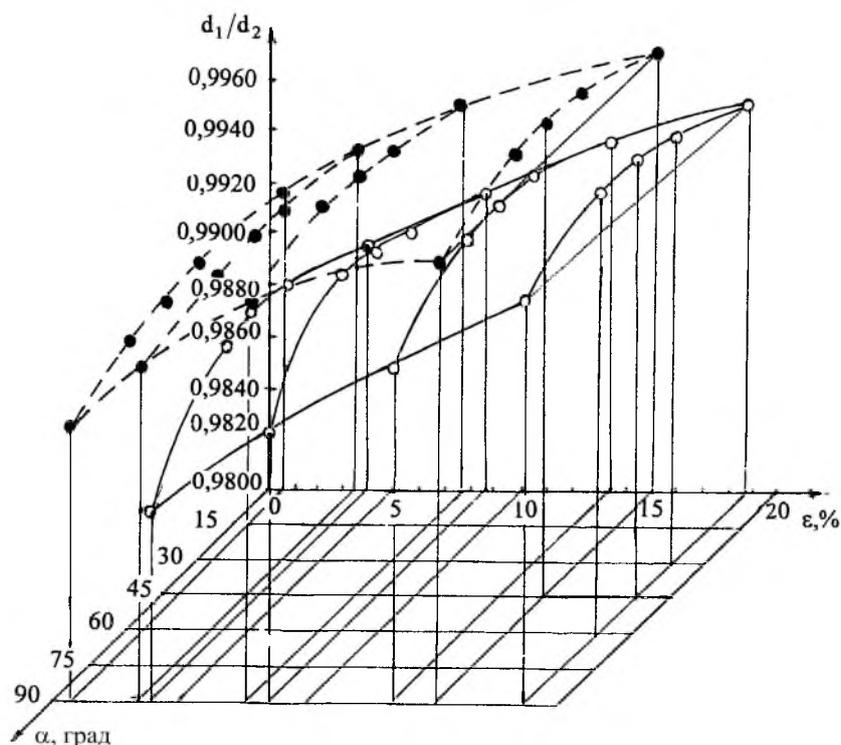


Рис. 2. Диаграмма изменения соотношения между диагоналями отпечатка в зависимости от степени анизотропии материалов АМг6 (светлые точки), Д16АМ (темные точки) и уровня деформации.

Рассмотрим процесс деформирования металла под индентором. Как известно, металл последовательно претерпевает вначале упругую деформацию, зависимость которой от напряжения определяется законом Гука, а затем пластическую и разрушение. На пределе текучести пластические деформации лунки соизмеримы с упругими деформациями. При переходе от упругой области к пластической на ее контуре отмечается максимальная плотность дислокаций, в результате чего в первую очередь пластически деформируется именно контур лунки [1]. Поэтому при снятии нагрузки с индентора геометрические размеры контура отпечатка остаются без изменений. В этом случае можно говорить о неустановившемся пластическом течении, когда пластическая область изменяется так, что ее конфигурация подобна некоторому исходному состоянию [16]. Однако при развитой пластической деформации геометрические размеры отпечатка изменяются. Разница между полной и упругой деформацией металла соответствует его пластической деформации в области лунки. Существенное влияние на точность измерения диагоналей отпечатка оказывают пластические свойства материала.

Как видно из рис. 1, наибольшая погрешность в измерении отпечатка наблюдается при испытании материалов с высокими свойствами пластичности. Это обусловлено тем, что при внедрении четырехгранного индентора под ним реализуется трехосное напряженное состояние с высокой долей гидростатического сжатия части материала [17]. При этом основная масса материала выдавливается из лунки с четырех сторон индентора, образуя пластическую область. Вытесненный металл формируется в виде валика (отвала), располагаемого по контуру отпечатка. Размеры валика и его расположение относительно кромки лунки зависят от свойств пластичности, способности к упрочнению и степени пластической деформации металла.

При индентировании материала с повышенными пластическими свойствами он выдавливается из лунки каждой гранью пирамидального индентора Виккерса и при выходе на поверхность контактирует с соседним материалом. В результате такого взаимодействия в зоне контакта в условиях стеснения деформации высота валика увеличивается, геометрия отпечатка нарушается, а его вершины приобретают размывчатую конфигурацию, что существенно затрудняет корректное определение длины диагоналей отпечатка. Таким образом, методическая ошибка в измерении диагонали отпечатка из-за неточного наведения сетки окуляра на его вершины обусловлена неоднозначностью положения вершин, а не ошибкой оператора. В этом случае следует увеличить количество отпечатков и вычислять среднее значение $d_{\text{ср}}$ по всем диагоналям.

Для изучения влияния расположения индентора относительно главных осей деформирования образца на величину отпечатка проводили специальные эксперименты на листовых алюминиевых сплавах АМг6 и Д16АМ, пластически деформированных соответственно до примерно одинаковых уровней деформации $\varepsilon = 7,65$ и $7,97\%$ и до предельных значений деформации $\varepsilon_{\text{max}} = 15,2$ и $18,5\%$. Индентор ориентировали таким образом, чтобы отпечатки располагались на центральной оси образца, совпадающей с направлением деформирования и с осью анизотропии материала под углами $\alpha = 0, 30, 45, 60^\circ$, т.е. при $\alpha = 0$ отпечатки ориентировались сторонами по указанным выше направлениям, а при $\alpha = 45^\circ$ – диагоналями. Результаты испытаний представлены в таблице.

При схеме расположения индентора, когда отпечаток ориентирован сторонами по оси деформирования образца ($\alpha = 0$), влияние упругих деформаций материала на размеры отпечатка вследствие его пластического деформирования значительно меньше, чем если отпечаток ориентирован диагоналями ($\alpha = 45^\circ$). В последнем случае диагонали отпечатка непосредственно изменяются на величину продольных b и поперечных b' упругих деформаций. Это подтверждается как данными эксперимента, так и результатом исследования изменения размеров отпечатка из-за упругого последействия (рис. 3).

Рассмотрим предельный случай, когда материал изотропен по модулю упругости ($b = b'$). При удалении индентора из лунки длины сторон a отпечатка уменьшаются на величину упругой деформации b (рис. 3,б), и его диагональ будет равна $d = (a - b)\sqrt{2}$, на эту же величину уменьшится диагональ другого отпечатка: $d = a\sqrt{2} - b$ (рис. 3,а). Видно, что расположение

индентора по схеме рис. 3,а по сравнению со схемой рис. 3,б теоретически может привести к погрешности в определении характеристик твердости до 40%. Реально из-за небольших упругих деформаций b и сопротивления смещению краев лунки, оказываемого отвалом металла, вытесненного на кромку отпечатка индентором, величина погрешности существенно меньше, но даже для материалов АМг6 и Д16АМ со слабо выраженными свойствами анизотропии она соответственно достигает 3,5 и 2,9% при предельных уровнях деформаций растяжения.

Влияние ориентировки индентора на характеристики отпечатка

ε, %	α, град			
	0	30	45	60
	АМг6			
7,65	$\frac{0,3060}{0,9954}$	$\frac{0,3079}{0,9963}$	$\frac{0,3085}{0,9998}$	$\frac{0,3082}{0,9982}$
15,20	$\frac{0,2806}{0,9968}$	$\frac{0,2855}{0,9982}$	$\frac{0,2904}{0,9985}$	$\frac{0,2870}{0,9989}$
	Д16АМ			
7,97	$\frac{0,3808}{0,9910}$	$\frac{0,3812}{0,9918}$	$\frac{0,3832}{0,9994}$	$\frac{0,3822}{0,9990}$
18,50	$\frac{0,3580}{0,9950}$	$\frac{0,3615}{0,9960}$	$\frac{0,3683}{0,9968}$	$\frac{0,3620}{0,9970}$

Примечание. Над чертой приведены средние значения длин диагоналей отпечатка в зависимости от его расположения относительно оси деформирования, под чертой – соотношение между диагоналями отпечатка.

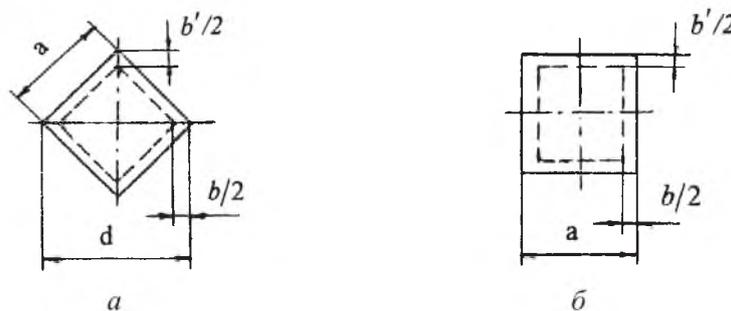


Рис. 3. Влияние упругих деформаций на размеры диагоналей разгруженного отпечатка при ориентировке индентора диагоналями (а) и сторонами (б).

Заключение. Анализ полученных результатов показал, что для материалов с повышенной анизотропией упругих и пластических свойств расположение индентора имеет определяющее значение. Чем выше уровень анизотропии упругопластических свойств металла, тем больше проявляется влияние угла наклона отпечатка на среднее значение диагоналей последнего. Поэтому для повышения достоверности получаемых результатов при проведении измерений твердости необходимо, чтобы положение индентора при каждом уколе не изменялось относительно осей анизотропии. При ориен-

тировке индентора, когда его грани по направлению совпадают с осями анизотропии металла, установленная ГОСТ 2999-75 2%-ная норма на расхождение в длинах диагоналей отпечатка для листовых материалов сохраняется также для анизотропных материалов, поскольку, несмотря на возможную разницу в длине сторон отпечатка, его диагонали будут примерно равны между собой. В этой связи можно рекомендовать внести в п.5.2 ГОСТ 2999-75 изменения. Вместо абзаца, описывающего анизотропные материалы, записать, что при испытаниях материалов на твердость индентор следует ориентировать таким образом, чтобы стороны отпечатков располагались по направлениям осей анизотропии материала.

Таким образом, учет анизотропии упругих и пластических свойств материала позволяет получать более корректные результаты испытания материалов на твердость. Для того чтобы исключить человеческий фактор при проведении испытаний на твердость, необходимо процесс измерения отпечатка автоматизировать, перейти от метода измерений твердости по разгруженному отпечатку к методу измерений по неразгруженному отпечатку.

Работа выполнена в соответствии с планом научных исследований по программе “Ресурс” (проект R2-13).

Резюме

Проаналізовано причини похибок методу втискування індентора статично прикладеним навантаженням при визначенні характеристик твердості за Віккерсом. Досліджено вплив анізотропії листових матеріалів на точність вимірювання твердості. Показано, що орієнтування відбитків відносно осей анізотропії матеріалу повинно бути незмінним при проведенні випробувань, причому орієнтування відбитку сторонами краще, ніж орієнтування відбитку діагоналями.

1. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
2. *ГОСТ 22762-77.* Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. – Введ. 01.01.79.
3. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л.* Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.
4. *Патент України № 52107А, МКІ 7, кл. G01N3/00, G01N3/40.* Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень у процесі напрацювання. “Метод LM- твердості”/ А. А. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 15.01.2003. Бюл. № 1.
5. *ГОСТ 2999-75.* Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – Введ. 01.07.76.
6. *Львовский Е. Н.* Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высш. шк., 1988. – 230 с.
7. *Микляев П. Г., Фридман Я. Б.* Анизотропия механических свойств материалов. – М.: Металлургия, 1962. – 272 с.

8. Горб М. А., Карпинос Д. М., Островский А. А. Экспериментальное исследование влияния деформационной анизотропии на упругопластические свойства тонколистовой стали // Пробл. прочности. – 1970. – № 7. – С. 25 – 30.
9. Жигалкин В. М. О характере упрочнения пластического материала. Сообщ. 1, 2 // Пробл. прочности. – 1980. – № 2. – С. 52 – 56; С. 56 – 62.
10. Пучков Б. И., Рахитадт А. Г., Рогельберг И. Л. Анизотропия предела упругости промышленных медных пружинных сплавов // Цвет. металлы. – 1962. – № 6. – С. 67 – 70.
11. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 415 с.
12. Жуков А. М. Деформационная анизотропия и ползучесть малоуглеродистой стали при нормальной температуре // Инж. журн. – 1961. – № 4. – С. 150 – 153.
13. Островский А. А. Исследование влияния предварительной деформации на анизотропию и механические свойства стали // Пробл. прочности. – 1975. – № 5. – С. 81 – 84.
14. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1990.
15. ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
16. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
17. Алехин В. П., Булычев С. И. Определение пористости при индентировании // Вест. Тамбов. гос. ун-та. – 2000. – 5, вып. 2–3. – С. 209 – 211.

Поступила 27. 10. 2005