

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.178.151

ВЗАИМОСВЯЗЬ ДЕФОРМАЦИЙ И ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И ВДАВЛИВАНИИ В ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ¹

© В. М. Матюнин, А. Ю. Марченков²*Статья поступила 14 декабря 2015 г.*

Получены аналитические зависимости равномерного удлинения δ_p и отношения предела текучести к временному сопротивлению металла от параметра деформационного упрочнения n , входящего в уравнение Е. Мейера. Эти зависимости подтверждены экспериментом для углеродистых сталей и сталей перлитного класса при определении n с использованием в микроскопе косой подсветки для измерения диаметра отпечатка. Для некоторых сталей аустенитного класса уравнение Е. Мейера не применимо из-за структурно-фазовых превращений в деформированном металле под отпечатком.

Ключевые слова: сферический индентор; вдавливание; параметр упрочнения; равномерное удлинение; предел текучести; временное сопротивление; диагностика металла.

Существующая методика определения механических свойств материалов индентированием основана на сопоставлении диаграмм вдавливания и растяжения в координатах напряжение — деформация [1]. Располагая связью деформации при вдавливании индентора с деформацией при растяжении образца, можно более обоснованно разработать такую методику. Как отмечал Н. Н. Давиденков, только незнание значений деформаций в месте контакта индентора служит единственным препятствием для установления зависимости между характеристиками твердости и прочности материалов. В связи с этим необходимо располагать не только способом оценки контактной деформации при вдавливании индентора, но и ее связью с деформацией при растяжении образца, по крайней мере в области равномерной деформации.

Для получения диаграмм вдавливания в координатах напряжение — деформация лучше использовать сферический индентор, чем пирамидальный, конический и пр. Это объясняется тем, что в процессе однократного вдавливания такого индентора значение контактной деформации увеличивается. При использовании пирамиды или конуса она остается постоянной, а для получения разных значений пластической де-

формации требуется набор таких инденторов с разными углами раскрытия при вершине.

Известны различные способы определения контактной деформации при вдавливании сферического индентора. Согласно Д. Тейбору [2] эффективная пластическая деформация на краю отпечатка может быть определена по формуле

$$\varepsilon = 0,2(d/D), \quad (1)$$

где d — диаметр отпечатка; D — диаметр индентора.

М. П. Марковец [1] выявил распределение пластической деформации поверхностных слоев отпечатка методом делительных сеток и предложил оценивать ее среднее значение по формуле

$$\Psi^{\text{вд}} = \frac{M-F}{M} = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2} \right], \quad (2)$$

где M — площадь поверхности отпечатка; F — площадь проекции отпечатка.

В работе [3] предложено определять контактную деформацию при вдавливании по формуле

$$\Psi^{\text{вд}} = \frac{M}{M_0} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2}, \quad (3)$$

где M_0 — площадь половины поверхности шара.

¹ Работа выполнена в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00166).

² Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт», e-mail: MatiuninVM@mpei.ru

Существуют и другие способы и формулы для оценки деформации при вдавливании, однако они также предусматривают измерение геометрических параметров отпечатка (диаметра, глубины, высоты напыля на краю отпечатка и др.). Как видно из формул (1) – (3), пластическая деформация при вдавливании зависит от относительного диаметра отпечатка d/D , а ее значения, рассчитанные по разным формулам при одном d/D , могут различаться более чем в два раза.

Для установления связи пластической деформации при вдавливании $\Psi_{вд}$ с пластической деформацией при растяжении образца (относительным удлинением δ или относительным сужением Ψ) необходимы специальные экспериментальные исследования диаграмм вдавливания и растяжения с учетом упрочняемости материала. При этом в качестве условной меры деформации при вдавливании следует выбрать или относительный диаметр отпечатка d/D , или относительную невозстановленную (t/R) или восстановленную (h/R) глубину отпечатка (R — радиус индентора). Так, например, в [3] при сопоставлении диаграмм вдавливания $HB - d/D$ и диаграмм растяжения $\sigma - \delta$ установлена степенная зависимость δ от d/D следующего вида:

$$\delta = \alpha(d/D)^\beta, \quad (4)$$

где α и β — постоянные коэффициенты для данного материала, зависящие от параметра деформационного упрочнения Мейера n .

Для вывода зависимостей α и β от n необходимо прежде всего найти связь n с предельным равномерным удлинением δ_p , соответствующим максимуму условной диаграммы растяжения $\sigma - \delta$. Диаграмма вдавливания $HB - d/D$ также имеет максимум, которому соответствует относительный диаметр отпечатка d_b/D . При подстановке в (4) $(d/D) = (d_b/D)$ можно определить δ_p , если известны α и β . Вместе с тем d_b/D зависит от параметра упрочнения n :

$$\frac{d_b}{D} = \frac{\sqrt{n(n-2)}}{n-1}. \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в (4), получим

$$\delta_p = \alpha \left(\frac{\sqrt{n(n-2)}}{n-1} \right)^\beta. \quad (6)$$

Таким образом, δ_p зависит только от n , причем α и β также зависят от n . Поэтому неслучайно ранее уже установлены эмпирические и полуэмпирические связи предельной равномерной деформации при растяжении с параметром упрочнения n . Предельную равномерную деформацию можно выразить не только как условное предельное равномерное удлинение δ_p

или сужение ψ_p , но и как истинное (логарифмическое) равномерное удлинение ϵ_p . Все перечисленные характеристики предельной равномерной деформации взаимосвязаны:

$$\delta_p = \frac{\Psi_p}{1-\Psi_p}; \quad \Psi_p = \frac{\delta_p}{1+\delta_p};$$

$$\epsilon_p = \ln(1+\delta_p) = \ln \frac{1}{1-\Psi_p}. \quad (7)$$

Приведем некоторые известные формулы, устанавливающие связь предельной равномерной деформации с параметром упрочнения n : Д. Тейбора [2] —

$$\psi_p = n - 2; \quad (8)$$

Кокадо [2] —

$$\psi_p = \frac{n-2}{2}; \quad (9)$$

Г. П. Зайцева [4] —

$$\delta_p = \frac{n-2}{1,3}; \quad (10)$$

В. М. Магюнина [3] —

$$\delta_p = \frac{n-2}{n-1}. \quad (11)$$

Следует также отметить зависимость, полученную Шварцем [5] при исследовании закона Е. Мейера,

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_b} = \left(\frac{\delta_s}{\delta_p} \right)^{\frac{n-2}{n}}, \quad (12)$$

где σ_s — условный предел текучести; σ_b — временное сопротивление; δ_s — деформация на пределе текучести; δ_p — условная равномерная деформация.

Если бы в левой части (12) вместо σ_b было S_b (истинное временное сопротивление), а в правой части вместо δ_p было ϵ_p , то можно было бы принять $\delta_p = (n-2)/n$, что следует из формулы Холломона $S = k\epsilon^n$. Однако из зависимости (12) такой вывод сделать нельзя.

Вместе с тем формулу для определения δ_p по параметру n можно получить аналитически следующим образом. Приняв по Д. Тейбору $HM = 3S$ (HM — твердость по Мейеру; S — истинное напряжение при растяжении образца) и $HB = 3\sigma$ (HB — твердость по Бри-

неллю; σ — условное напряжение при растяжении образца), при d_b/D можно записать

$$\frac{HM_B}{HB_B} = \frac{S_B}{\sigma_B}, \quad (13)$$

где HM_B и HB_B — значения твердости по Мейеру и по Бринеллю соответственно при $d/D = d_b/D$.

С учетом формулы (5) получим [3]

$$\frac{HM_B}{HB_B} = \frac{2(n-1)}{n}. \quad (14)$$

Тогда из равенства (13) следует

$$\frac{S_B}{\sigma_B} = \frac{2(n-1)}{n}. \quad (15)$$

Поскольку $S_B = \sigma_B(1 + \delta_p)$, то из (15) получим

$$\delta_p = \frac{n-2}{n}. \quad (16)$$

Формально показатель степени в уравнении (12) совпадает с правой частью равенства (16). Однако из формул (7) и (16) следует:

$$\varepsilon_p = \ln \frac{2(n-1)}{n}; \quad \Psi_p = \frac{1}{2} \frac{n-2}{n-1}. \quad (17)$$

Интересно отметить, что при подстановке в (2) уравнения (5) можно получить деформацию при вдавливании $\Psi_B^{вд} = \frac{1}{2} \frac{n-2}{n-1}$, которая совпадает с предельным равномерным сужением образца Ψ_p согласно (17).

Сопоставив формулы (8)–(11) и (16), можно отметить, что значения предельной равномерной деформации, рассчитанные по одному и тому же значению n , также сильно различаются (более чем в 2 раза). Это различие можно объяснить следующими основными причинами: особенностями методик определения равномерной деформации и параметра упрочнения n , соблюдением или несоблюдением условий физического, механического и геометрического подобия при определении этих характеристик растяжением и вдавливанием, а также классом и марками испытываемых материалов.

Кроме того, в зависимости от химсостава, микроструктуры и способа получения материалов в них могут происходить структурно-фазовые изменения при нагружении вдавливанием или растяжением. Например, у некоторых марок аустенитной стали в процессе пластической деформации при окружающей комнат-

ной температуре происходит $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение с образованием мартенсита и сталь приобретает магнитные свойства.

Установлено [6], что на определяемые значения n и δ_p дополнительно влияет размерный эффект и тем в большей мере, чем меньше размеры индентора и образца. С уменьшением диаметра индентора D и исходного диаметра разрывного образца d_0 значения n и δ_p постепенно снижаются. А для обеспечения деформирования материала вдавливанием и растяжением на одном размерном уровне необходимо выдержать правильное соотношение между D и d_0 (как показали наши исследования, $d_0 \approx 2D$).

Для определения δ_p при растяжении образца и n при вдавливании индентора существуют различные методики, имеющие свои преимущества и недостатки. В [3] рассмотрены и практически опробованы методики определения предельной равномерной деформации по машинным диаграммам растяжения и по изменению диаметра образца за пределами шейки. Если принять, что максимум диаграммы растяжения соответствует предельному равномерному удлинению δ_p , то точность определения δ_p будет зависеть от точности поиска точки, соответствующей максимальному усилию. Для малопластичных материалов эта задача решается просто, а у высокопластичных материалов с большой равномерной деформацией на максимуме диаграммы растяжения образуется практически горизонтальная площадка, которая затрудняет поиск точки с максимальным усилием. Если предельную равномерную деформацию оценивать по предельному равномерному сужению образца Ψ_p , то конусность разрушенного образца за пределами шейки может внести существенные погрешности в определяемые значения Ψ_p .

В связи с этим предложена [3] методика определения δ_p по точке, соответствующей середине горизонтального участка на максимуме диаграммы растяжения. Для этого необходимо провести горизонтальную линию, отстоящую вниз от максимума диаграммы на 1–1,5 % от значения максимального усилия. Середина отрезка этой линии между точками пересечения с линией диаграммы принимается за абсолютное равномерное удлинение. Однако эта методика также имеет недостатки из-за условного допуска при проведении горизонтальной линии и предположения окончания равномерной деформации в центре горизонтального участка.

Вместе с тем с появлением испытательных машин с программным обеспечением обработки диаграмм растяжения и автоматизированным определением точки с максимальным усилием исключаются субъективные ошибки, имеющие место при ручной обработке диаграммы. А точность регистрации этой точки зависит только от точности измерения нагрузки датчиком

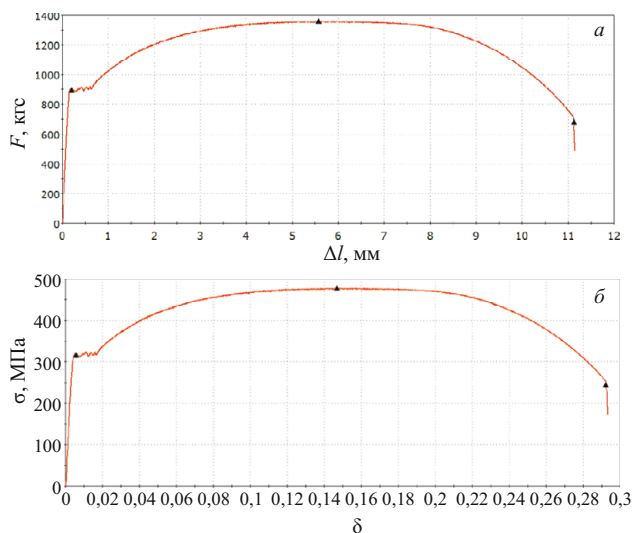


Рис. 1. Диаграммы растяжения пятикратного цилиндрического образца диаметром 6 мм из стали 12Х1МФ: а и б — первичная и условная диаграммы

усилия машины. В связи с этим для определения δ_p сталей различных марок и классов была использована универсальная испытательная машина Instron 5982 с программным обеспечением Bluehill-3. При растяжении образца на такой машине практически одновременно регистрируются сразу две диаграммы: усилие F — абсолютное приращение рабочей длины образца Δl и $\sigma - \delta$ в режиме реального времени. При этом на диаграмме отмечаются реперные точки, соответствующие не только максимальному усилию, но и пределу текучести, а также окончательному разрушению образца на две части.

На рис. 1 приведены такие диаграммы растяжения пятикратного цилиндрического образца диаметром 6 мм из стали 12Х1МФ. Скорость растяжения образца при комнатной температуре составляла 2 мм/мин. Аналогичным образом были испытаны образцы и из других марок стали с разным δ_p (табл. 1). Равномерное удлинение δ_p рассчитывалось в данном случае как отношение остаточного абсолютного удлинения Δl_p к рабочей длине образца l_p . Следует отметить, что δ_p , определенная по рабочей исходной длине образца l_p , будет существенно ниже δ_p , найденной по расчетной

исходной длине образца l_0 . Для испытанных образцов с $l_p = 38$ мм и $l_0 = 30$ мм значения δ_p при расчете по l_p получались в 1,27 раза меньше, чем при расчете по l_0 .

Для определения параметра упрочнения n при вдавливании сферического индентора также существуют различные методики. Самая обоснованная и достоверная из них состоит в определении n по диаграмме вдавливания в координатах нагрузка F — диаметр остаточного отпечатка d . При этом диаграмма должна включать значения d/D в диапазоне от 0,1 (примерно на уровне предела текучести) до d_b/D (на уровне максимальной твердости HB_b). Затем значения n рассчитывают статистической обработкой всего массива экспериментальных данных $F - d$ с аппроксимацией степенной зависимостью Мейера: $F = ad^n$. Другие методики определения n предусматривают два вдавливания индентора одного диаметра или инденторов разных диаметров с измерением нагрузок и соответствующих им диаметров отпечатков. При двукратном вдавливании одного индентора под разными нагрузками параметр n определяют по формуле

$$n = \frac{\ln(F_1/F_2)}{\ln(d_1/d_2)}, \quad (18)$$

где F_1 и F_2 — нагрузки вдавливания; d_1 и d_2 — диаметры отпечатков, соответствующие F_1 и F_2 .

Для этой методики двукратного вдавливания индентора одного диаметра важное значение имеет выбранное соотношение нагрузок F_1 и F_2 . Как показывает опыт, F_2 должна соответствовать HB_b , а отношение $F_2/F_1 = 2 \div 3$. В данной работе выбрано соотношение $F_2/F_1 = 3$, причем нагрузка $F_2 = kD^2$ (k — степень нагружения, регламентированная ГОСТ 9012–59 при определении HB). При таком соотношении F_1 и F_2 увеличивается повторяемость результатов определения n для одного материала, а его значение достаточно близко к значению n , полученному статистической обработкой степенной зависимости $F = ad^n$.

Еще одно обстоятельство, влияющее на определяемые значения n , заключается в способе измерения диаметра отпечатка с помощью микроскопа. С увеличением нагрузки вдавливания наплыв металла вокруг

Таблица 1. Значения механических характеристик сталей, определенные при растяжении и вдавливании

Марка стали	Растяжение				Вдавливание ($D = 2,5$ мм)				
	$\sigma_{0,2}$		σ_b		δ_p	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	n	δ_p	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$
	Н/мм ²	кг/мм ²	Н/мм ²	кг/мм ²					
Сталь 10	226	21,0	378	38,5	0,180	0,597	2,42	0,174	0,606
15ГС	330	33,6	530	54,0	0,166	0,622	2,36	0,152	0,649
12Х1МФ	320	32,6	477	48,6	0,142	0,671	2,33	0,142	0,673
25Х2МФА	682	70,5	875	89,2	0,085	0,790	2,20	0,091	0,793
20Х13	721	73,5	893	90,1	0,068	0,816	2,16	0,074	0,837
ЭИ-474	1187	121,0	1342	136,8	0,057	0,884	2,13	0,061	0,872

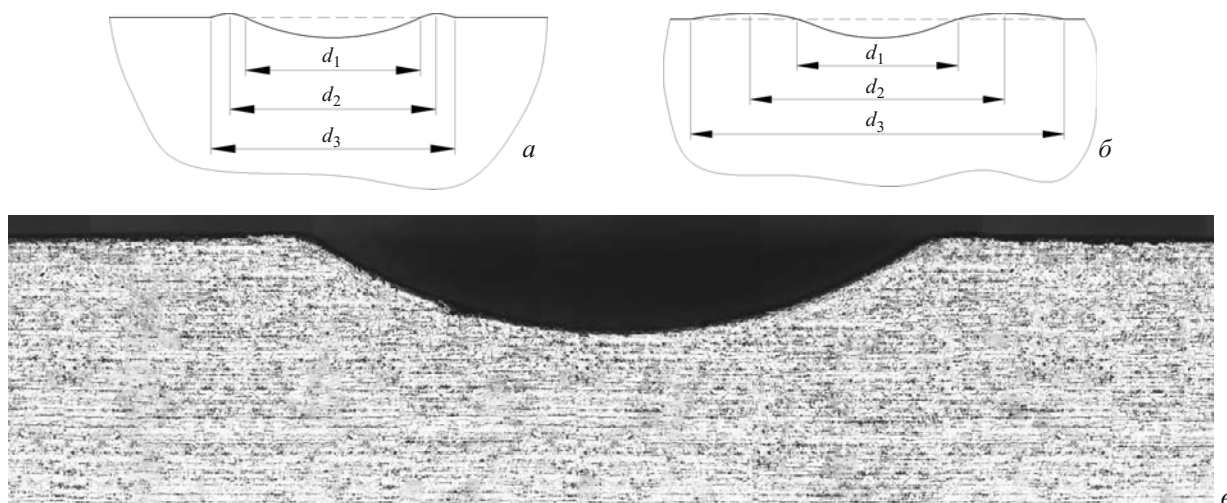


Рис. 2. Схемы измерения диаметров отпечатка в случае образования различных по форме наплывов (*a*, *б*) и фотография разреза по меридиональной плоскости шлифа из стали 20 с отпечатком (*в*)

Таблица 2. Результаты измерения диаметров отпечатка при прямой и косой подсветках, а также в поперечном разрезе по меридиональному сечению (шлифы из стали 20, $D = 15,1$ мм)

На поверхности шлифа				В сечении отпечатка					
$F_1 = 10\,997$ Н (1121 кг)		$F_2 = 70\,004$ Н (7136 кг)		$F_1 = 10\,997$ Н (1121 кг)			$F_2 = 70\,004$ Н (7136 кг)		
$d_{пр}$, мм	$d_{кос}$, мм	$d_{пр}$, мм	$d_{кос}$, мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм
3,971	3,952	9,002	8,719	3,909	3,967	4,003	8,505	8,742	9,166

отпечатка, образующийся при вытеснении металла индентором, затрудняет измерение диаметра отпечатка с помощью микроскопа.

При использовании в микроскопе прямой и косой подсветок измеряемые значения диаметра отпечатка различаются. При прямой подсветке (луч света направлен перпендикулярно к поверхности металла) получается увеличенный диаметр отпечатка d_3 (рис. 2, *a* и *б*), а при косой подсветке (луч света направлен под углом к поверхности металла) определяется диаметр d_2 , который меньше d_3 . Даже небольшое увеличение диаметра отпечатка при одной нагрузке вдавливания может привести к существенному различию параметра упрочнения n ; чем больше d , тем меньше n . Косая подсветка позволяет более точно измерять диаметры отпечатка за счет четкого отображения его периметра.

В работе использовали индентор диаметром $D = 2,5$ мм. Применяли косую подсветку для измерения диаметра отпечатка, а поэтому получаемые значения n превосходили n , определенные при прямой подсветке [3]. Этим можно объяснить различие формул (11) и (16), поскольку при выводе (11) использовали прямую подсветку, при которой измеряли диаметр отпечатка d_3 , а при выводе (16) — косую подсветку, при которой определяли диаметр отпечатка d_2 . Чтобы выяснить, какой диаметр отпечатка измеряется при прямой и косой подсветках, был проведен следующий эксперимент. На двух шлифах из стали 20 были получены отпечатки при вдавливании шара диаметром

Таблица 3. Результаты определения параметра деформационного упрочнения n по диаметрам отпечатков, измеренным на поверхности шлифов с прямой и косой подсветками и в меридиональных сечениях отпечатков ($D = 15,1$ мм)

На поверхности шлифа		В сечении отпечатка		
по $d_{пр}$	по $d_{кос}$	по d_1	по d_2	по d_3
2,26	2,34	2,38	2,33	2,23

15,1 мм под нагрузками $F_1 = 10\,997$ Н (1121 кг) и $F_2 = 70\,004$ Н (7136 кг). Затем диаметры отпечатков измеряли с использованием прямой ($d_{пр}$) и косой ($d_{кос}$) подсветок. После этого шлифы разрезали по меридиональной плоскости, проходящей через центр отпечатка, что давало возможность четко увидеть под микроскопом форму наплыва металла вокруг отпечатка и измерить значения диаметров d_1 , d_2 , d_3 (см. рис. 2, *a*). Результаты всех измерений диаметров отпечатков представлены в табл. 2. Они показывают, что диаметр отпечатка при прямой подсветке $d_{пр}$ равен d_3 , а при косой подсветке $d_{кос}$ равен d_2 . Диаметр d_1 соответствует диаметру отпечатка без наплыва вокруг отпечатка. В данном случае d_3 превосходит d_2 на 3 %, а d_1 — на 5 %. Это различие диаметров отпечатка будет увеличиваться с ростом нагрузки F . В обычной практике индентирования определить диаметр d_1 весьма проблематично. Поэтому речь может идти о диаметрах d_2 и

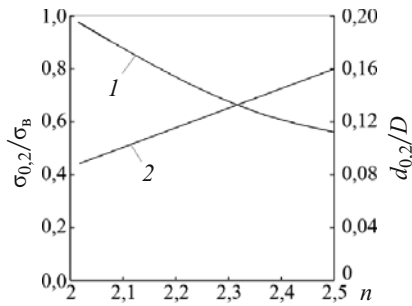


Рис. 3. Зависимости $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ (1) и $d_{0,2}/D$ (2) от параметра упрочнения n

d_3 . При малых отношениях $d/D \approx 0,1 \div 0,2$ значения d_2 и d_3 различаются незначительно.

По диаметрам отпечатков, представленным в табл. 2, были рассчитаны соответствующие параметры деформационного упрочнения n (табл. 3) с использованием формулы (18). Значение параметра n , определенного на поверхности шлифа по $d_{\text{кос}}$, практически совпало с n , найденным в меридиональном сечении отпечатка по диаметру d_2 .

В табл. 1 приведены параметры n , δ_p , определенные вдавливанием и растяжением. Из нее следует, что значения δ_p , найденные вдавливанием с использованием формулы (18), а также полученные путем растяжения образца, отличаются не более чем на 10 %.

Одним из практических выходов формулы (16) для расчета δ_p является то, что с ее использованием можно найти выражение для расчета отношения предела текучести $\sigma_{0,2}$ к временному сопротивлению $\sigma_{\text{в}}$, т.е. $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$, по параметру упрочнения n .

Принимая $\delta_p = \frac{n-2}{n}$ и $\psi_p = \frac{1}{2} \frac{n-2}{n-1}$, из уравнения

Холломона получим

$$S_{0,2} = k\sigma_{0,2}^{\psi_p}, S_{\text{в}} = k\delta_p^{\psi_p}. \quad (19)$$

При $\sigma_{0,2} = 0,002$ и $S_{0,2} = \sigma_{0,2}$ можно записать

$$\frac{\sigma_{0,2}}{S_{\text{в}}} = \left(\frac{0,002}{\delta_p} \right)^{\psi_p} = \left(\frac{0,002n}{n-2} \right)^{\psi_p}. \quad (20)$$

Поскольку $S_{\text{в}} = \sigma_{\text{в}} \frac{2n-1}{n}$, то из (20) следует

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\text{в}}} = \left(\frac{0,002n}{n-2} \right)^{2(n-1)} \frac{2(n-1)}{n}. \quad (21)$$

В табл. 1 приведены отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ для некоторых марок сталей, а на рис. 3 представлена зависимость $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ от n . Видно (см. табл. 1), что значения $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$, определенные растяжением образцов и вда-

вливанием сферического индентора, достаточно близки между собой для испытанных марок сталей.

Решая совместно уравнения Холломона и Мейера

$$\begin{cases} S = k\delta^{\psi_p} \\ HM = b(d/D)^{n-2} \end{cases} \quad (22)$$

с учетом (5) и (17), можно получить

$$\delta = \frac{(n-2)}{n} \left[\frac{n-1}{\sqrt{n(n-2)}} \right]^{2(n-1)} \left(\frac{d}{D} \right)^{2(n-1)}. \quad (23)$$

При сравнении формул (4) и (23) видим, что

$$\alpha = \frac{(n-2)}{n} \left[\frac{n-1}{\sqrt{n(n-2)}} \right]^{2(n-1)}, \quad (24)$$

$$\beta = 2(n-1). \quad (25)$$

Задавая $\delta = 0,002$, из (23) найдем относительный диаметр отпечатка на пределе текучести:

$$\frac{d_{0,2}}{D} = \left(\frac{0,002n}{n-2} \right)^{\frac{1}{2(n-1)}} \frac{\sqrt{n(n-2)}}{n-1}. \quad (26)$$

Зависимость $d_{0,2}/D$ от n также представлена на рис. 3. По $d_{0,2}/D$ можно определить нагрузку вдавливания на пределе текучести $F_{0,2}$, а затем рассчитать твердость на пределе текучести $HB_{0,2}$ и предел текучести $\sigma_{0,2}$ [1]. Однако такой способ определения $HB_{0,2}$ и $\sigma_{0,2}$ достаточно сложен по сравнению с определением $\sigma_{\text{в}}$ по $HB_{\text{в}}$ или HB [3]. Однако если определен параметр упрочнения n , то по нему можно рассчитать отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ (21), которое позволит при известном $\sigma_{\text{в}}$ количественно оценить $\sigma_{0,2}$.

Известно, что отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ является важным диагностическим параметром структурно-механического состояния металла. Чем больше значение $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ и оно ближе к единице, тем меньше запас упрочняемости металла и он больше склонен к хрупкому разрушению. Поэтому в некоторых нормативных документах установлено верхнее допустимое значение $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$. Например, для углеродистых сталей оно равно 0,7, а для сталей перлитного класса — 0,8. Учитывая однозначную связь $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ с параметром упрочнения n , можно использовать n в качестве диагностического параметра при обследовании структурно-механического состояния металла и конструкций с использованием переносных приборов — твердомеров статического действия.

Таким образом, установлено, что определяемые значения параметра деформационного упрочнения n , входящего в уравнение Е. Мейера, зависят от способа подсветки при измерении диаметра отпечатка с помощью микроскопа. Диаметр отпечатка, полученный при прямой подсветке, превосходит диаметр этого же отпечатка, определенного при косой подсветке, вследствие влияния наплыва вокруг отпечатка. Поэтому значения параметра n получаются выше при косой подсветке, которая дает более четкое изображение контура отпечатка, чем прямая подсветка.

Получены аналитические зависимости предельного равномерного удлинения δ_p и отношения предела текучести к временному сопротивлению $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ от параметра n , которые хорошо подтверждаются экспериментом при определении n с использованием косой подсветки для углеродистых сталей и сталей перлитного класса. Для некоторых сталей аустенитного класса эти зависимости могут давать большие расхождения с экспериментом из-за структурно-фазовых превращений в деформированном объеме металла под отпечатком, например, из-за образования мартенсита. Поэтому для таких сталей закономерность Е. Мейера не выполняется.

Предложено использовать параметр n в качестве диагностического параметра при обследовании структурно-механического состояния металла деталей и конструкций с использованием переносных приборов — твердомеров статического действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марковец М. П.** Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1971. — 171 с.
2. **Tabor D.** The hardness of metals. — Great Britain: Oxford University press, 1951.
3. **Матюнин В. М.** Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 216 с.
4. **Зайцев Г. П.** Твердость по Бринеллю как функция параметров пластичности материалов / Заводская лаборатория. 1949. Т. 15. № 6. С. 704 – 717.
5. **O'Neill H.** The hardness of metals and its measurement. — London: Chapman and Hall Ltd., 1934.
6. **Матюнин В. М., Дубов А. А., Марченков А. Ю.** Общие закономерности проявления масштабного фактора при определении прочности и твердости металла / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 8. С. 43 – 47.

REFERENCES

1. **Markovets M. P.** Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti [Determination of metals mechanical properties using the hardness values]. — Moscow: Mashinostroenie, 1971. — 171 p. [in Russian].
2. **Tabor D.** The hardness of metals. — Great Britain: Oxford University press, 1951.
3. **Matyunin V. M.** Operativnaya diagnostika mekhanicheskikh svoystv konstruktivnykh materialov [Express diagnosis of constructional materials mechanical properties]. — Moscow: Izdatel'skii dom MEI, 2006. — 216 p. [in Russian].
4. **Zaitsev G. P.** Tverdost' po Brinellyu kak funktsiya parametrov plastichnosti materialov [Brinell hardness as the function of materials plasticity] / Zavod. Lab. 1949. Vol. 15. N 6. P. 704 – 717 [in Russian].
5. **O'Neill H.** The hardness of metals and its measurement. — London: Chapman and Hall Ltd., 1934.
6. **Matyunin V. M., Dubov A. A., Marchenkov A. Yu.** Obshchie zakonomernosti proyavleniya masshtabnogo faktora pri opredelenii prochnosti i tverdosti metalla [Regularities in the manifestation of the scale factor during determination of the strength and hardness of a metal] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2010. Vol. 76. N 8. P. 43 – 47 [in Russian].