

УДК 620.178:620.172.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ И МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ФЕРРИТА МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© Р. А. Воробьев^{1,2}, В. Н. Литовченко¹, В. Н. Дубинский²*Статья поступила 22 июня 2015 г.*

Методом кинетического индентирования на микроуровне определены механические характеристики феррита в стали 10. Индентирование проводили в микродиапазоне при следующих параметрах: верхний предел испытательной нагрузки 2 Н; предел глубины индентирования 9 мкм; радиус скругления четырехгранного индентора Виккерса $R = 0,22$ мкм. Нагрузку индентирования варьировали от 10 до 2000 мН, время выдержки под постоянной нагрузкой — от 10 до 60 с. Установлены закономерности изменения получаемых при кинетическом индентировании характеристик, таких как модуль упругости, твердость по Виккерсу и кинетическая твердость, от нагрузки индентирования и времени выдержки под нагрузкой. Исследования проводили с целью совершенствования методики кинетического индентирования, уменьшения расхождения результатов и выявления факторов, на них влияющих.

Ключевые слова: механические свойства; термическая обработка; низкоуглеродистая сталь; индентирование; твердость; модуль упругости; микроструктура.

Использование метода кинетического индентирования, позволяющего записывать диаграмму нагружения в координатах сила — глубина внедрения индентора, расширило возможности определения физико-механических характеристик материала, особенно с появлением приборов высокой чувствительности и разрешающей способности, а также специального инструментария по компьютерной обработке полученных данных. Метод превратился в тонкий многофункциональный исследовательский инструмент, пригодный для решения разнообразных физических задач и выяснения фундаментальных закономерностей поведения приповерхностных слоев и субмикронных объемов самых разных материалов — от мягких биологических до сверхтвердых алмазоподобных [1, 2].

В то же время игнорирование ряда погрешностей, отсутствие общепринятых методик получения физических характеристик материала из первичных данных приводит в некоторых случаях к большим расхождениям результатов, которые ошибочно могут трактоваться как реальные эффекты.

Цель данной работы — изучение закономерностей изменения получаемых при кинетическом индентировании характеристик, таких как модуль упругости, твердость по Виккерсу и кинетическая твердость, от нагрузки индентирования и времени выдержки под нагрузкой с целью совершенствования методики, уменьшения расхождения результатов и выявления влияющих на них факторов.

Кинетическое индентирование образцов проводили на установке Fischerscope HM2000 компьютеризированной измерительной системы, предназначенной в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.748 для определения микротвердости HV , глубины индентирования $h_{\max}$, глубины восстановленного отпечатка $h_{\text{отп}}$ и модуля упругости E_{IT} , ГПа. Параметры индентирования: верхний предел испытательной нагрузки 2 Н; предел глубины индентирования до 9 мкм; радиус скругления четырехгранного индентора Виккерса $R = 0,22$ мкм [3]. Нагрузку индентирования варьировали от 10 до 2000 мН и время выдержки под постоянной нагрузкой — от 10 до 60 с.

Проводили сравнение значений твердости по Виккерсу, полученных при кинетическом индентировании на установке Fischerscope HM2000 и при измерении твердости методом восстановленного отпечатка на микротвердомере HNV. Кроме того, изучали закономерности изменения кинетической твердости и модуля упругости с увеличением нагрузки индентирования при времени выдержки 30 с.

Известно, что при микроиндентировании полученные результаты зависят от однородности структуры материала. Поэтому объектом исследования выбрали отожженные образцы из стали 10. В отожженных материалах средняя плотность дислокаций составляет $10^4 - 10^6 \text{ см}^{-2}$, чему соответствует среднее расстояние между ними 100 – 10 мкм. Микроструктуру изучали на поперечных шлифах при увеличении 100 – 500 на металлографическом микроскопе МТ 7530F. Количественное соотношение феррита и перлита в микроструктуре ~90:10.

¹ АО «ЦНИИ «Буревестник», г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: VNLitov@gmail.com

² Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: linuxjuicy@gmail.com

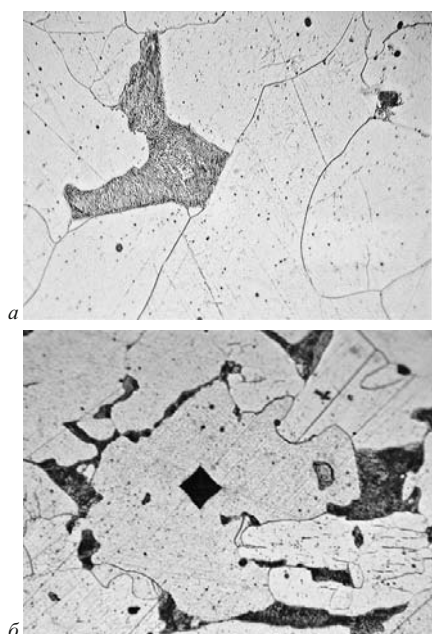


Рис. 1. Микроструктура стали 10 после отжига, балл зерна № 3: а — $\times 500$; б — $\times 250$

Образцы из стали 10 отжигали при температуре 1300°C в течение 1 ч. В результате получили средний диаметр зерен феррита $100 - 130$ мкм, что соответствует баллу № 3 по ГОСТ 5639 (рис. 1, а). При этом на участки вблизи границ зерен феррита с высокой вероятностью приходится основная плотность дислокаций, а центральная часть зерна (вдали от границ зерен) становится практически бездислокационной.

В результате при испытаниях на микротвердость с нагрузкой не выше 2 Н (диагональ отпечатка ~ 50 мкм) обеспечивалась возможность получения отпечатка в центре зерна (рис. 1, б), что минимизирует вклад в сопротивление пластической деформации от границ зерен и дислокаций [4, 5].

Данная подготовка образцов позволяет при индентировании снизить вероятность появления «эффектов», связанных с неоднородностью микро- и субмикроструктуры, увеличить сходимость результатов опытов и минимизировать погрешность измерений.

Влияние метода индентирования и времени выдержки при индентировании на результаты измерения твердости. Твердость феррита измеряли двумя методами: восстановленного отпечатка (ГОСТ 2999) и кинетического измерения твердости (ГОСТ Р 8.748). Исследовали влияние времени выдержки индентора под нагрузкой на значения твердости по Виккерсу, из-

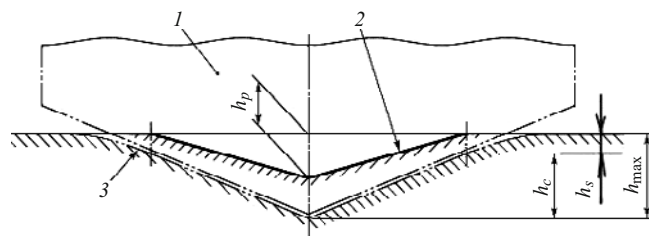


Рис. 2. Схема продольного сечения зоны индентирования: 1 — наконечник; 2 — поверхность отпечатка в испытуемом образце после полной разгрузки; 3 — поверхность соприкосновения испытуемого образца с наконечником при максимальной глубине индентирования и испытательной нагрузке

меренной различными способами. Нагрузка индентирования — 2 Н. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Твердость по Виккерсу при кинетическом индентировании вычисляли на основании корреляции между значениями H_{IT} и HV , где H_{IT} — инструментальная твердость индентирования, определяемая как (ГОСТ Р 8.748)

$$H_{IT} = F_{\max}/A_p, \quad (1)$$

где $F_{\max}$ — пик индентирующей силы; A_p — проекция контактной области.

Проекция контактной области

$$A_p = gh_c^2, \quad (2)$$

где g — так называемый форм-фактор, для индентора Виккерса $g = 24,5$;

$$h_c = h_{\max} - h_s \quad (3)$$

«контактная глубина»,

$$h_s = \varepsilon(h_{\max} - h_r) \quad (4)$$

смещение поверхности по контактному периоду (упругая деформация поверхности), h_r — глубина лунки после разгрузки, $h_{\max}$ — общая глубина внедрения индентора, ε — поправочный коэффициент, для индентора Виккерса равный $3/4$ (рис. 2).

Глубину лунки после разгрузки h_r оценивали по кривой разгрузки 2 на диаграмме с помощью касательной 3 (рис. 3). Зная h_c , по выражению (2) находили проекцию контактной области A_p и из формулы (1) определяли инструментальную твердость H_{IT} .

Далее твердость по Виккерсу вычисляли на основании корреляционных зависимостей между значе-

Таблица 1. Результаты измерения твердости по Виккерсу методом восстановленного отпечатка и кинетической твердости

Прибор (метод измерения твердости)	Время выдержки, с		
	10	30	60
Микротвердомер НМV (метод восстановленного отпечатка)	119	123	115
Установка Fischerscope HM2000 (метод восстановленного отпечатка)	127	118	120
Установка Fischerscope HM2000 (измерение кинетической твердости)	135	128	134

ниями H_{IT} и HV , программно заложенных в софт для установки Fischerscope HM2000. Из литературных источников известны следующие зависимости: $H_{IT} = 1,07HV$ — для материалов, у которых отсутствует восстановление диагоналей после разгрузки; $H_{IT} = 10,6HV$ — для материалов, имеющих и пластическую, и упругую деформации. Похожий алгоритм расчета используют и на других подобных системах индентирования [6].

Результаты, полученные при измерении твердости методом восстановленного отпечатка (ГОСТ 2999) на разных установках (Fischerscope HM2000 и микротвердомер HNV), отличаются незначительно (см. табл. 1).

В зависимости от времени выдержки под нагрузкой твердость по Виккерсу не изменяется и колебания полученных значений находятся в пределах ошибки измерения; ГОСТ 2999 регламентирует время выдержки под нагрузкой не менее 3 с.

Наиболее интересные результаты измерения твердости по Виккерсу получены при кинетическом индентировании на установке Fischerscope HM2000 с записью диаграммы нагружения и использованием корреляционных зависимостей. Значения твердости независимо от изменения времени выдержки под нагрузкой находятся примерно на одном уровне (см. табл. 1), но они на 6 – 10 % выше, чем при использовании метода восстановленного отпечатка. Большие значения твердости по Виккерсу, полученные методом кинетического индентирования, объясняются в основном тем, что площади, определенные по h_{max} , оказываются завышенными, а по h_r — заниженными. Вклад в расхождение результатов при использовании метода кинетического индентирования вносят также усредненные корреляционные зависимости, по которым в итоге и определяют твердость по Виккерсу. Для уменьшения погрешности измерений корреляционные зависимости необходимо строить самостоятельно и индивидуально для каждого материала и его состояния.

Несмотря на, казалось бы, однозначное геометрическое соотношение между высотой (кинетическая твердость) и диагональю соответствующего сечения пирамидки значения твердостей, измеренные методами восстановленного отпечатка и кинетического индентирования, расходятся, иногда даже в несколько раз.

Еще одним из значимых факторов, влияющих на расхождение результатов определения твердости, является то, что при измерении кинетической твердости (в отличие от классической) учитывается не только пластическая, но упругая деформация [7].

В табл. 2 представлены результаты измерения глубин индентирования при определении твердости как по методу восстановленного отпечатка ($h_{отп}$), так и при измерении кинетической твердости (h_{max}).

Независимо от времени выдержки в среднем отличие глубин составляет около 8 %, что, в свою очередь,

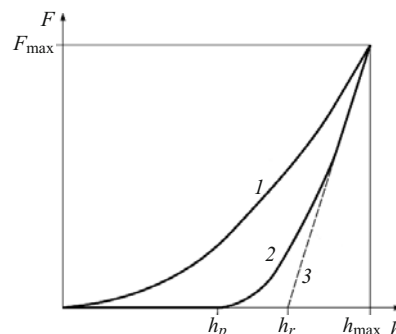


Рис. 3. Зависимость нагрузки от глубины индентирования

вносит свой вклад в расхождения данных при измерении твердости по Виккерсу рассматриваемыми методами, потому что соотношение между упругой и пластической деформациями (при одинаковых условиях испытаний) напрямую зависит от состояния материала.

Установлено, что глубина отпечатков (см. табл. 2) (как и твердость) от времени выдержки практически не зависит.

Таким образом, H_{IT} коррелирует с HV , но HV (твердость по Виккерсу), вычисленная из значений H_{IT} , не может быть надежной заменой HV , полученной методом восстановленного отпечатка.

Анализ полученных данных при измерении твердости по Виккерсу и кинетической твердости позволяет сделать следующие выводы.

1. Метод восстановленного отпечатка (измерение диагоналей после снятия нагрузки) независимо от установки, на которой проводили измерения (микротвердомер HNV или Fischerscope HM2000), на одних и тех же образцах дает идентичные результаты твердости по Виккерсу.

2. Время выдержки под нагрузкой при индентировании и измерении твердости по Виккерсу не влияет на результаты измерений, что подтверждено результатами испытаний при 10, 30, 60 с; ГОСТ 2999 регламентирует время выдержки под нагрузкой не менее 3 с.

3. При кинетическом измерении твердости по Виккерсу на установке Fischerscope HM2000 время выдержки под нагрузкой незначительно влияет на результаты испытаний; все отклонения находятся в пределах погрешности измерений.

4. Значения твердости по Виккерсу, полученные при кинетическом индентировании, оказываются на

Таблица 2. Результаты измерения глубины индентирования на приборе Fischerscope HM2000

Глубины внедрения и их отличие	Время выдержки, с	
	10	60
$h_{отп}$, мкм	7,26	7,25
h_{max} , мкм	7,94	7,88
Δ , %	8,40	8,02

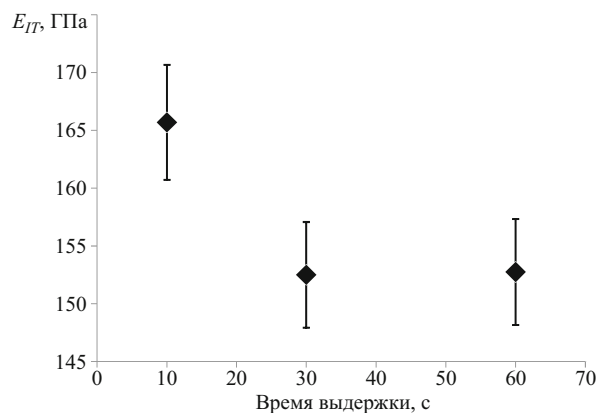


Рис. 4. Зависимость модуля упругости при кинетическом индентировании от времени выдержки образца под нагрузкой

6 – 10 % выше, чем определенные по методу восстановленного отпечатка.

5. Расхождения в результатах испытаний связаны со следующими причинами:

при измерении кинетической твердости учитываются и пластическая, и упругая деформации, соотношение которых напрямую зависит от состояния материала и получаемых при этом глубин индентирования;

при инструментальном индентировании определяется кинетическая твердость H_{IT} , а твердость по Виккерсу вычисляется на основании корреляции между значениями H_{IT} и HV ;

значения твердостей, измеренные этими двумя способами, расходятся иногда в несколько раз, поэтому корреляционные зависимости необходимо строить для каждого материала и его состояния индивидуально.

6. Твердость HV , рассчитанную из H_{IT} , нельзя использовать в качестве надежной замены HV , полученной методом восстановленного отпечатка.

Влияние времени выдержки при кинетическом индентировании на модуль упругости E_{IT} материала. В отличие от твердости, модуль упругости E_{IT} , определяемый кинетическим методом индентирования, оказался чувствительным к длительности проведения испытания (рис. 4).

С увеличением времени выдержки от 10 до 30 с модуль упругости E_{IT} линейно понижается с 166 до 153 ГПа, при дальнейшем повышении времени выдержки он не изменяется. Это связано, вероятно, с тем, что по мере нахождения индентора под нагрузкой напряжения в месте укола релаксируют в большей степени, поэтому и модуль упругости начинает снижаться.

Необходимо отметить, что степень деформации ε_{IT} металла под индентором во время выдержки 10, 30 и 60 с различна (рис. 5). При 10 с выдержки она составляет ~2,6 %, при 30 – 60 — ~3,2 %.

Данные эффекты обусловлены тем, что в процессе локального нагружения может образовываться сильно неравновесная структура, которая продолжает релак-

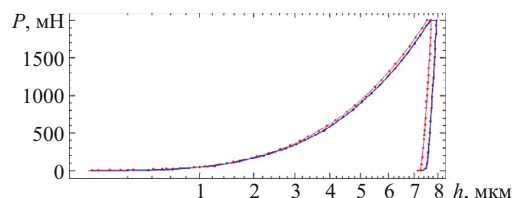


Рис. 5. Диаграмма нагружения образцов при инструментальном индентировании с нагрузкой 2000 мН: 1 — время выдержки 10 с; 2 — 30 и 60 с

сировать и после прохождения максимума нагрузки. Это приводит к продолжающемуся росту деформации несмотря на достижение нагрузкой своего максимума.

Данный процесс влияет на положение кривой разгрузки при построении диаграммы $P-h$ и, соответственно, на результаты измерения модуля упругости (ГОСТ Р 8.748).

Деформация металла под индентором реализуется через диффузионную подвижность неравновесных точечных дефектов (недислокационный механизм пластичности). В отожженных монокристаллах и крупнокристаллических поликристаллах, в которых зернограничной и трубочной диффузией можно пренебречь, определяющий вклад в скорость ползучести обеспечивает объемная диффузия по телу зерна [8, 9].

Необходимо учитывать, что на характеристики, получаемые кинетическим индентированием, влияют следующие факторы [3]:

- внешние вибрации;
- наклеп поверхности образца при полировке;
- увеличение относительной погрешности измерения размеров отпечатка при уменьшении нагрузки;
- большая относительная доля упругого восстановления для маленького отпечатка;
- индентирование «бездислокационных объемов» с твердостью, приближающейся к теоретическому пределу;
- наклеп во время индентирования;
- влияние границ зерен и включений;
- влияние несовершенств индентора;
- изменение отношения поверхности контакта к индентируемому объему;
- наличие «краевого» эффекта — дополнительной изгибной деформации по краю отпечатка.

Таким образом, перед испытанием необходима тщательная подготовка образцов в соответствии с требованиями ГОСТ 2999. Измерения отдельных элементов структуры материала следует проводить, не задевая границ зерен и других фаз. Это существенно снижает разброс получаемых характеристик при индентировании.

Влияние нагрузки при индентировании на кинетическую твердость и модуль упругости. На отожженных образцах из стали 10 изучали влияние нагрузки индентирования на кинетическую твердость H_{IT} и модуль упругости E_{IT} . Интервал варьирования нагрузки

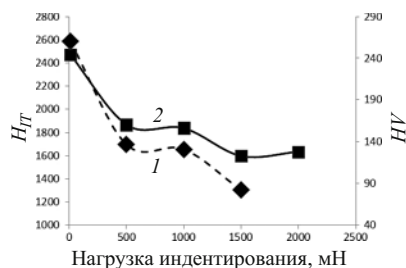


Рис. 6. Зависимости твердости образцов от нагрузки индентирования: 1 — H_{IT} ; 2 — HV

составлял 10 – 2000 мН, время выдержки под нагрузкой — 30 с.

С уменьшением индентирующей нагрузки и размера отпечатка измеренные значения кинетической твердости по Виккерсу HV и твердости индентирования H_{IT} увеличиваются (проявление размерного эффекта). Результаты измерений представлены в табл. 3 и на рис. 6.

Наличие размерного эффекта при микро- и наноиндентировании говорит о том, что традиционное определение твердости как отношения нагрузки к площади отпечатка не отражает баланса энергий при индентировании.

Работа, затраченная на индентирование, делится на две составляющие, связанные с изменением объема (пластической деформацией в объеме отпечатка) и с увеличением поверхности (с поверхностной энергией). При этом с уменьшением размеров отпечатка относительный вклад второго слагаемого возрастает [6].

При увеличении нагрузки индентирования с 10 до 1500 мН кинетическая твердость по Виккерсу уменьшается с 244 до 123 HV . Начиная с нагрузки 1500 мН значения твердости выравниваются и находятся примерно на одном уровне: 123 HV при 1500 мН, 128 HV при 2000 мН (см. рис. 6).

Причем динамика изменения твердости по Виккерсу в зависимости от нагрузки, а следовательно, от глубины индентирования носит нелинейный характер. Полученную кривую можно разбить на три участка с разной глубиной индентирования (рис. 7):

- 1) 0,39 – 3,58 мкм (10 – 500 мН);
- 2) 3,58 – 7,15 мкм (500 – 1500 мН);
- 3) свыше 7,15 мкм (более 1500 мН).

Деформация металла под индентором при малых нагрузках индентирования (первый участок) реализуется через диффузионную подвижность неравновесных точечных дефектов (механизм пластичности недислокационный, поскольку происходит индентирование «бездислокационных объемов» с завышенной твердостью).

В отожженных монокристаллах и крупнокристаллических поликристаллах, в которых зернограницной и трубочной диффузией можно пренебречь, определяющий вклад в сопротивление пластической дефор-

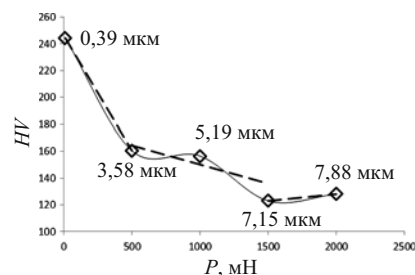


Рис. 7. Зависимость изменения твердости образцов по Виккерсу от нагрузки индентирования

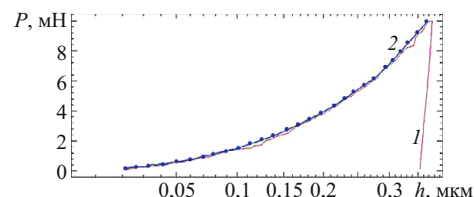


Рис. 8. Характер изменения зависимости $P-h$ при индентировании: 1 и 2 — глубина индентирования 0,39 мкм (0 – 10 мН) и свыше 7 мкм (0 – 2 Н)

мации обеспечивает объемная диффузия по телу зерна при нормальной температуре.

Необходимо также учитывать, что при небольших нагрузках индентирования (10 – 500 мН) высока относительная доля упругого восстановления отпечатка, в результате чего значения кинетической твердости также высоки (244 HV при 10 мН и 128 HV при 2000 мН).

Зависимость $P-h$ при малых нагрузках индентирования отличается от подобных зависимостей при более высоких нагрузках наличием ступенек на кривой нагружения (рис. 8). Упругоупругий переход происходит скачкообразно и сопровождается быстрым погружением индентора в материал под действием неизменной нагрузки. Такое поведение материала монокристалла (зерна) под индентором объясняется гомогенным зарождением дислокаций при достижении критических напряжений в микрообъеме [9].

Вследствие сильной стесненности деформации (в микрообъемах) в материале возникают высокие упругие напряжения, вплоть до предела текучести («дислокационный голод»), с чем и связаны высокие значения твердости и модуля упругости ($E_{IT} = 277$ ГПа) при малых контактах взаимодействия

Таблица 3. Влияние нагрузки индентирования на результаты измерений

Нагрузка P , мН	H_{IT} , Н/мм ²	HV	E_{IT} , ГПа	h_{max} , мкм
10	2586	244	277	0,39
500	1698	160	180	3,58
1000	1657	157	134	5,19
1500	1302	123	116	7,15
2000	1350	128	153	7,88

Таблица 4. Влияние нагрузки индентирования на результаты измерений

Нагрузка P , мН	HV	ΔHV	HV_{cp}	E_{IT} , ГПа	ΔE_{IT} , ГПа	E_{ITcp}
10	244	84	202	277	97	229
500	160			180		
1000	157	34	136	134	37	134
1500	123			116		
2000	128			153		

индентора с поверхностью металла (см. табл. 3) по сравнению с $E_{IT} = 153$ ГПа при больших нагрузках индентирования.

Дальнейший рост силы вдавливания (участки 2 и 3 на рис. 7) приводит к развитию упругопластической деформации под индентором и увеличению размеров локально-деформированной области, в которой и упругая, и пластическая компоненты одинаково важны. В результате уменьшается разброс значений кинетической твердости и модуля упругости, получаемые характеристики при этом выходят на постоянный уровень (табл. 4).

Данные кинетической твердости и модуля упругости, полученные при индентировании с меняющейся (увеличивающейся) нагрузкой (1000 – 2000 мН), находятся в удовлетворительном согласии с результатами, полученными при индентировании с нагрузкой 2000 мН при варьировании времени выдержки 30 – 60 с (см. табл. 1, 2).

В заключение следует сделать вывод, что при использовании метода кинетического индентирования в микродиапазоне для уменьшения влияния размерного эффекта характеристики (твердости, модуля упругости) разных материалов или разных состояний одного материала следует сравнивать при обеспечении (за счет подбора нагрузки) одинаковой глубины отпечатка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булычев С. И. Достижения и перспективы испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора / Заводская лаборатория. 1992. Т. 58. № 3. С. 29 – 36.
2. Матюнин В. М., Марченков А. Ю., Волков П. В. Диагностика механических свойств материалов по диаграммам индентирования на разных масштабных уровнях / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 4. С. 47 – 52.
3. Петржик М. И., Штанский Д. В., Левашов Е. А. Современные методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей / Материалы X Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». — М.: ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2004. С. 311 – 318.
4. Дубинский В. Н., Воробьев Р. А. Дефекты кристаллической решетки и прочность металлов и сплавов: Учеб. пособие. — Н. Новгород: НГТУ, 2013. — 88 с.

5. Воробьева Г. А. Конструкционные стали и сплавы. — СПб.: Политехника, 2013. — 440 с.
6. Федосов С. А. Определение механических свойств материалов микроиндентированием. — М.: Физический факультет МГУ, 2004. — 100 с.
7. Булычев С. И., Алехин В. П. Испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.
8. Головин С. А., Левин Д. М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. — М.: Машиностроение, 1987. — 190 с.
9. Головин Ю. И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках / Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 12. С. 2113 – 2142.

REFERENCES

1. Bulychov S. I. Dostizheniya i perspektivy ispytaniya materialov nepre-ryvnym vдавливaniem indentora [Achievements and perspectives of materials testing by continuous indentation method] / Zavod. Lab. 1992. Vol. 58. N 3. P. 29 – 36 [in Russian].
2. Matyunin V. M., Marchenkov A. Yu., Volkov P. V. Diagnostika mekhanicheskikh svoistv materialov po diagrammam indentirovaniya na raznykh masshtabnykh urovnyakh [Diagnosis of the mechanical properties of materials from the indentation diagrams at different scale levels] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 4. P. 47 – 52 [in Russian].
3. Petrzhik M. I., Shtanskii D. V., Levashov E. A. Sovremennyye metody otsenki mekhanicheskikh i tribologicheskikh svoistv funktsional'nykh poverkhnostei [Modern methods of estimation of mechanical and tribological properties of functional surfaces] / Proc. of the X Int. Sci.-tech. Design Conf. "High technologies in the industry in Russia." — Moscow: Izd. OAO TsNITI "Tekhnomash," 2004. P. 311 – 318 [in Russian].
4. Dubinskii V. N., Vorob'ev R. A. Defekty kristallicheskoj reshetki i prochnost' metallov i splovov: Ucheb. posobie [Defects in the crystal lattice and the strength of metals and alloys. Tutorial]. — N. Novgorod: Izd. NGTU, 2013. — 88 p. [in Russian].
5. Vorob'eva G. A. Konstruktsionnye stali i splavy [Structural steel and alloys]. — St. Petersburg: Politehnika, 2013. — 440 p. [in Russian].
6. Fedosov S. A. Opredelenie mekhanicheskikh svoistv materialov mikroindentirovaniem [Determination of mechanical properties of materials by microindentation]. — Moscow: Izd. Fizicheskii fakultet MGU, 2004. — 100 p. [in Russian].
7. Bulychov S. I., Alekhin V. P. Ispytaniya materialov nepreryvnym vдавливaniem indentora [Material testing by continuous indenter denting]. — Moscow: Mashinostroenie, 1990. — 224 p. [in Russian].
8. Golovin S. A., Levin D. M. Uprugie i dempfiruyushchie svoistva konstruktivnykh metallicheskh materialov [The elastic and damping properties of structural metallic materials]. — Moscow: Mashinostroenie. 1987. — 190 p. [in Russian].
9. Golovin Yu. I. Nanoindentirovanie i mekhanicheskie svoistva tverdykh tel v submikroob'emakh, tonkikh pripoverkhnostnykh sloyakh i plen-kakh [Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin surface layers and films] / Fizika Tverdogo Tela. 2008. Vol. 50. N 12. P. 2113 – 2142.