

УДК 620.178.151

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВНОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛА ПО КИНЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЕ ВДАВЛИВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА¹

© В. М. Матюнин, А. Ю. Марченков, П. В. Волков²*Статья поступила 9 февраля 2016 г.*

Предложена методика определения условного предела текучести материала по кинетической диаграмме вдавливания сферического индентора в координатах нагрузка — упругопластическое сближение. В основе методики лежит определение контактного напряжения на начальной стадии индентирования, при котором упругая и пластическая составляющие упругопластического сближения равны между собой.

Ключевые слова: условный предел текучести; сферический индентор; кинетическая диаграмма вдавливания; параметр упрочнения; модуль нормальной упругости.

Предел текучести — физический или условный — является одним из основных механических свойств материалов. Он используется не только как приемосдаточная характеристика качества материала, но и для выбора способов и режимов его обработки, а также для расчетов на прочность деталей и конструкций. Чаще всего предел текучести определяется по диаграммам растяжения стандартных образцов, что материалоемко и трудоемко, особенно при поточном контроле материалов и изделий в заводских условиях. Для оценки механических свойств (включая предел текучести) материалов после длительной эксплуатации оборудования необходимы его остановка, вырезка заготовок для изготовления образцов, а затем восстановление разрушенных мест.

Поэтому давно появились способы определения предела текучести материала без изготовления и испытания образцов на растяжение. Наиболее известен способ определения условного предела текучести вдавливанием шара, предложенный М. П. Марковцом [1]. Согласно этому способу необходимо определить нагрузку вдавливания $F_{0,2}$, при которой в отпечатке создается остаточная контактная деформация $\Psi_{вд} = 0,2\%$. Для ее оценки М. П. Марковец предложил формулу, в которой $\Psi_{вд}$ зависит от отношения диаметра отпечатка d к диаметру индентора D :

$$\Psi_{вд} = 0,5 \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}. \quad (1)$$

Принимая $\Psi_{вд} = 0,002$, из (1) можно найти относительный диаметр отпечатка на пределе текучести

$d_{0,2}/D$, примерно равный 0,09. По нагрузке $F_{0,2}$ и диаметру $d_{0,2}$ рассчитывают твердость на пределе текучести $H_{0,2}$, которая коррелирует с условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ в виде степенного уравнения [2]

$$\sigma_{0,2} = aH_{0,2}^b, \quad (2)$$

где коэффициенты a и b различаются для материалов разных классов, например, для черных и цветных металлов.

Однако при использовании изложенного способа необходимо неоднократное вдавливание индентора для получения отпечатка заданного размера. Этот способ трудно автоматизировать в целях повышения производительности испытаний и снижения погрешности измерений нагрузки и диаметров отпечатков. Поэтому ученики М. П. Марковца предложили определять условный предел текучести по кинетическим диаграммам вдавливания сферического индентора [3 – 8]. Такие диаграммы расширяют возможности индентирования. Например, с помощью кинетической диаграммы вдавливания можно зарегистрировать начальный упругий участок деформирования с переходом упругой деформации в упругопластическую [7], разделить упругую и пластическую деформации на последующих участках деформирования материала, автоматизировать и ускорить процесс испытаний. Однако и при кинетическом индентировании задача определения условного предела текучести оказалась весьма сложной и не до конца решенной. Основная трудность заключается в установлении надежной связи пластической деформации при растяжении образца и вдавливании индентора, позволяющей обоснованно устанавливать допуск на пластическую деформацию по параметрам кинетического индентирования. При решении этой задачи необходимо учитывать не только

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: MатиuninVM@mpei.ru

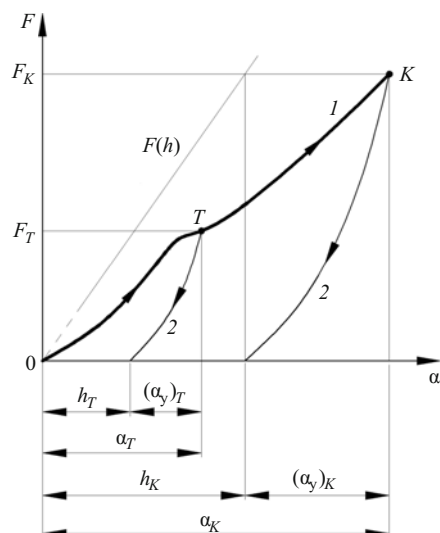


Рис. 1. Схема кинетической диаграммы вдавливания сферического индентора $F - \alpha$, включающей упругий и начальный упругопластический участки индентирования: 1 — линия нагружения; 2 — линии разгрузки; T — точка в зоне перехода упругой деформации в упругопластическую; F_T — нагрузка вдавливания, соответствующая точке T ; h_T и $(\alpha_y)_T$ — пластическая и упругая составляющие общего упругопластического сближения α_T в точке T ; K — точка достижения максимальной нагрузки вдавливания F_K ; h_K и $(\alpha_y)_K$ — пластическая и упругая составляющие общего упругопластического сближения α_K в точке K

геометрические, но и физико-механические параметры, такие как деформационное упрочнение, упругие константы испытуемого материала и материала индентора и др. В связи с этим предлагается более простая методика определения условного предела текучести — по кинетической диаграмме вдавливания сферического индентора. В основе методики лежит определение такого условного контактного напряжения, при котором на начальном участке индентирования упругая и пластическая составляющие общего упругопластического сближения равны.

Схема, поясняющая методику, представлена на рис. 1. Здесь показан начальный участок кинетической диаграммы вдавливания сферического индентора с переходом упругой деформации в упругопластическую.

Диаграмма вдавливания регистрируется в координатах нагрузка вдавливания F — упругопластическое сближение α . Под α следует понимать сближение центра шара с центром невосстановленной поверхности отпечатка. Максимальная нагрузка вдавливания F_K выбирается в зависимости от уровня твердости материала и диаметра индентора D . Например, для конструкционных сталей различных классов и марок можно установить $F_K = 10D^2$, что гарантирует достижение развитой упругопластической деформации для $D = 2,5 - 10$ мм. Диаграмма $F - \alpha$ содержит линии нагружения и разгрузки (см. рис. 1). Переход упругой деформации в упругопластическую при нагружении происходит плавно. В зоне этого перехода находится единственная точка T , в которой пластическая h_T и уп-

ругая $(\alpha_y)_T$ составляющие общего упругопластического сближения α_T равны между собой.

Для определения по методу Бринелля среднего контактного напряжения HB_T , соответствующего точке T , необходимо знать нагрузку F_T и глубину невосстановленного отпечатка t_T :

$$HB_T = \frac{F_T}{2\pi R t_T}, \quad (3)$$

где R — радиус индентора.

Невосстановленная глубина отпечатка

$$t_T = h_T + (W_m)_T, \quad (4)$$

где $(W_m)_T$ — упругое восстановление материала в центре отпечатка после снятия нагрузки F_T .

Зная $(\alpha_y)_T$, можно рассчитать

$$(W_m)_T = \gamma(\alpha_y)_T, \quad (5)$$

где коэффициент $\gamma = E_n/(E_n + E_m)$, E_n и E_m — модули нормальной упругости материала шара и испытуемого материала соответственно. Из формул (4) и (5) с учетом $(\alpha_y)_T = h_T$ получим

$$t_T = h_T(1 + \gamma). \quad (6)$$

Если $E_n = E_m$, то $\gamma = 1/2$ и

$$t_T = (3/2)h_T. \quad (7)$$

Формулу для определения F_T можно получить из общей прямолинейной зависимости, установленной А. Мартенсом и Е. Гейном [9]:

$$F = kh, \quad (8)$$

где k — коэффициент с размерностью Н/мм, характеризующий упрочнение материала в области пластической деформации.

Прямо пропорциональная связь между F и h поддерживается при увеличении F до некоторого значения h/D , зависящего от твердости материала и его способности к упрочнению. Эту связь можно представить в другом виде:

$$F = qhR, \quad (9)$$

где $q = F/(hR)$ является также параметром деформационного упрочнения, имеющим размерность контактного напряжения (Н/мм²). Зная параметр q , можно получить нагрузку

$$F_T = qh_T R. \quad (10)$$

Как следует из (8), прямая линия зависимости F от h при экстраполяции проходит через начало координат. Вместе с тем согласно работам М. С. Дрозда [10, 11] эта прямая линия отсекает на оси ординат небольшой отрезок, равный нагрузке, при которой за-

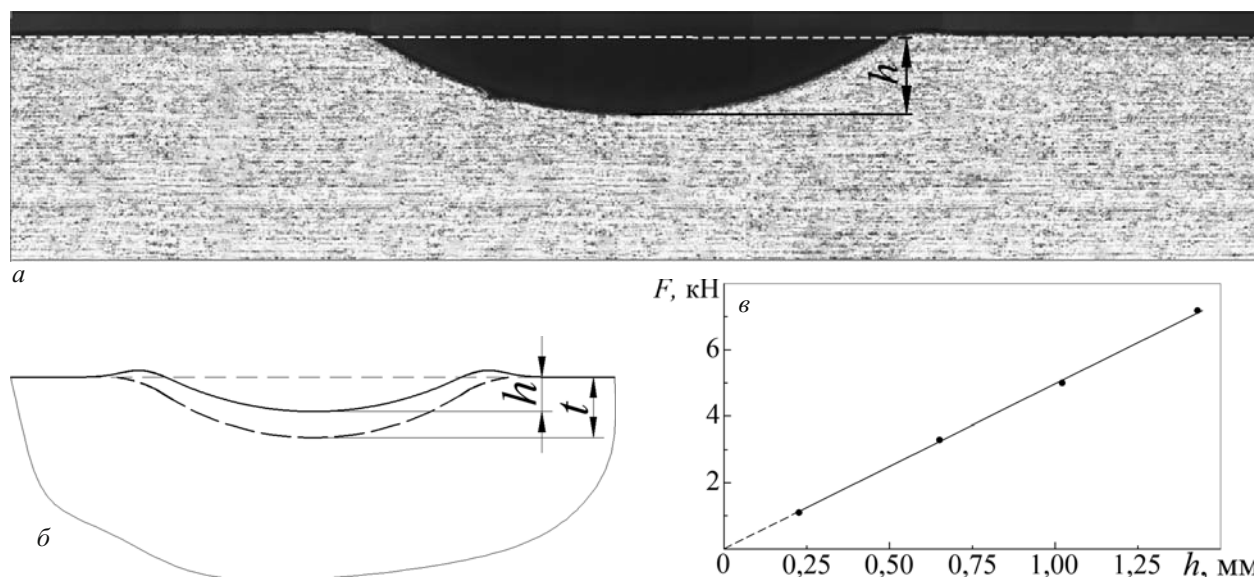


Рис. 2. Фото меридионального сечения отпечатка (а), схема измерения восстановленной глубины отпечатка h (б) и экспериментальная зависимость между F и h (в)

рождается пластический отпечаток. По мнению Б. И. Пилипчука [12], необходимо проведение тщательных специальных экспериментов на твердых и мягких материалах для выяснения этих вопросов.

Авторы данной статьи провели эксперименты по получению связи между F и h двумя независимыми способами. Первый из них состоял в прямом измерении с помощью микроскопа восстановленной глубины отпечатка по его меридиональному сечению. На рис. 2, а представлена плоскость сечения отпечатка, а на рис. 2, б — схема измерения восстановленной глубины отпечатка. Отпечатки были получены на плитке из стали 10 при вдавливании шара из стали ШХ15 диаметром 15,1 мм под разными нагрузками. На рис. 2, в показана связь между F и h , полученная по экспериментальным точкам. Эта зависимость имеет вид прямой линии, а при экстраполяции она проходит через начало координат.

Другой способ состоял в регистрации диаграмм вдавливания для разных мест поверхности стальной контрольной плитки с однородными структурой и твердостью по всему объему при постепенном увеличении конечной нагрузки F_K . Были испытаны три плитки с низкой (100 HB2,5/187,5/5), средней (160 HB2,5/187,5/5) и высокой (380 HB2,5/187,5/5) твердостью. Выбор контрольных плиток с разной твердостью объяснялся тем, что, возможно, зависимость (8) подтверждается только для мягких материалов, а для твердых материалов прямые линии отсекают на оси ординат некоторые малые отрезки. На каждой контрольной плитке было зарегистрировано по семь диаграмм вдавливания при разных значениях нагрузки F_K . Испытания проводили на автоматизированном приборе МЭИ-ТА при вдавливании индентора из стали ШХ15 диаметром $D = 2,5$ мм [7]. Значения остаточных глубин h определяли по точке пересечения линии

разгрузки диаграммы с осью абсцисс. На рис. 3 представлены примеры таких диаграмм вдавливания для плитки с твердостью 160 HB2,5/187,5/5.

По результатам испытаний всех трех плиток были построены зависимости F от h , которые показаны на рис. 4. Из него видно, что прямые линии при экстраполяции на малые нагрузки проходят через начало координат.

Следует отметить, что и при циклических нагружениях и разгрузках материала с регистрацией диаграмм вдавливания в одном и том же отпечатке с постепенным увеличением нагрузки F_K зависимость (8) также подтверждается экспериментальными данными.

Вместе с тем прямолинейная зависимость F от h сохраняется при увеличении нагрузки вдавливания до некоторого значения отношения h_K/R , которое связано с предельной остаточной деформацией материала Ψ_P . С увеличением Ψ_P возрастает также h_K/R , что установлено в [7].

Таким образом, формула (8) подтверждена и для мягкой, и для твердой стали. Поэтому формула (10) для расчета нагрузки F_T также обоснована.

Исходя из формул (3), (6) и (10), получаем

$$HB_T = \frac{q}{2\pi(1+\gamma)}. \quad (11)$$

При $E_n = E_m$ формула (11) примет вид:

$$HB_T = q/3\pi. \quad (12)$$

По своему физическому смыслу HB_T соответствует твердости на уровне условного предела текучести при растяжении образца, если его определять при равенстве упругой и пластической составляющих на начальном упругопластическом участке диаграммы.

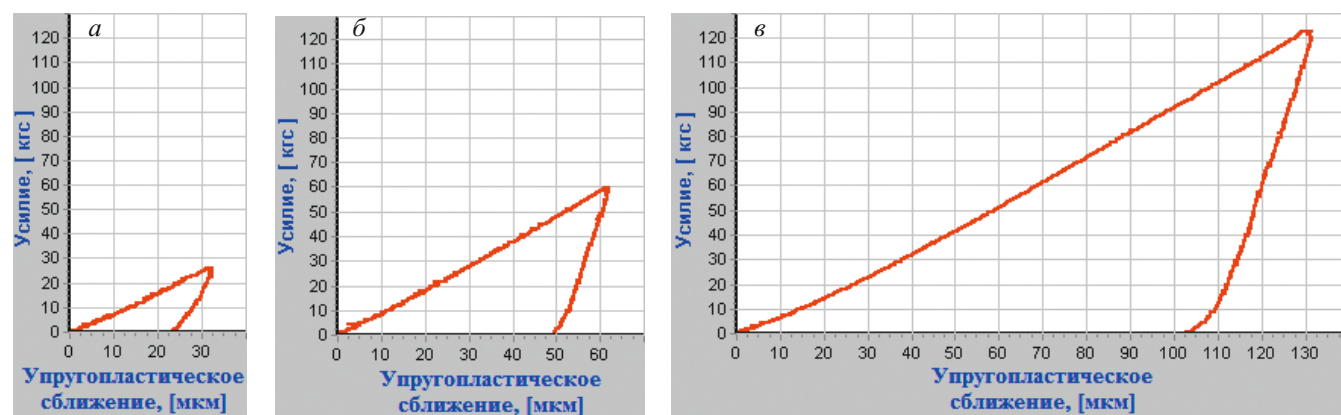


Рис. 3. Кинетические диаграммы вдавливания $F - \alpha$, зарегистрированные на автоматизированном приборе МЭИ-ТА при разных F_K для контрольной плитки с твердостью 160 HB2,5/187,5/5

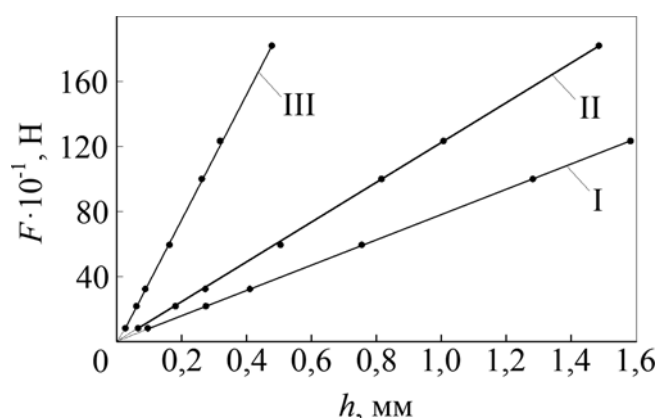


Рис. 4. Экспериментальные связи между F и h для стальных плиток с разной твердостью: I — 100 HB2,5/187,5/5; II — 160 HB2,5/187,5/5; III — 380 HB2,5/187,5/5

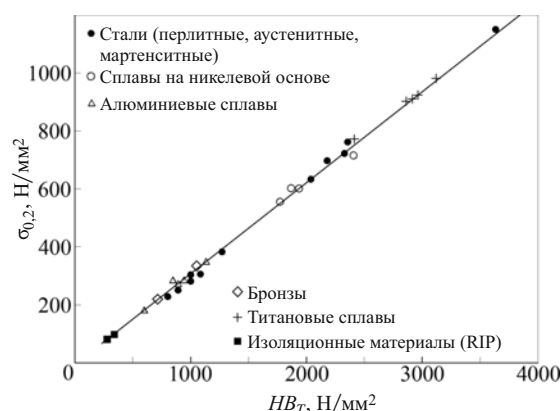


Рис. 5. Зависимость условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ от твердости на пределе текучести HB_T

Методика оценки условного предела текучести $\sigma_{y/p}$ по диаграмме растяжения для данного случая рассмотрена в [13]. Показано, что для сталей, имеющих площадку текучести, физический предел текучести при растяжении образца σ_T практически совпадает с $\sigma_{y/p}$. Для сталей без площадки текучести $\sigma_{y/p}$ отличается от условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ более $\pm 5\%$.

Совпадение σ_T и $\sigma_{y/p}$ можно объяснить тем, что точка, соответствующая равенству упругой и пластической деформации, находится в пределах площадки текучести. Причем и на диаграммах вдавливания в координатах $HB - d/D$ или $HB - t/R$ также можно выявить площадку, условно сходную с площадкой текучести при растяжении [7, 14]. Точка, которая соответствует HB_T , находится в пределах площадки текучести на диаграммах $HB - d/D$ или $HB - t/R$. Исходя из этого, следует искать корреляционные связи $\sigma_{y/p}$ с HB_T или σ_T с HB_T . Однако при растяжении образца с четко выявленной площадкой текучести физический предел текучести σ_T практически совпадает с условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$. Вместе с тем большинство конструкционных материалов не имеет площадки текучести на диаграмме растяжения, а поэтому целесообразно искать корреляционную связь $\sigma_{0,2}$ с HB_T . Такая связь выявлена для сталей различных марок и классов, алюминиевых и титановых сплавов, бронзы и изоляционных материалов (рис. 5). Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что эта связь с коэффициентом корреляции $r = 0,985$ имеет следующий вид:

$$\sigma_{0,2} = 0,321HB_T - 20,4, \text{ Н/мм}^2. \quad (13)$$

Экспериментальная проверка формулы (13) на других материалах показала, что относительное отклонение значений $\sigma_{0,2}$, определенных растяжением и вдавливанием, не превышает $\pm 7\%$.

Остается невыясненным вопрос об определении модуля нормальной упругости испытуемого материала E_m , если он неизвестен. По имеющимся методикам его находят по кинетическим диаграммам вдавливания [4, 7, 15]. Они основаны на уравнении Г. Герца, в котором нагрузка вдавливания зависит от радиуса индентора R , упругого сближения α_y и упругих констант (модуля нормальной упругости E и коэффициента Пуассона μ) испытуемого материала и материала индентора. Приняв $\mu_i = \mu_m = 0,28 - 0,3$ и введя поправ-

ку λ на пластическую деформацию [11], можно получить зависимость E_m от R , F_K , α_K , h_K , $(\alpha_y)_K$:

$$E_m = \frac{1 - \mu_m^2}{4R^{0.5} [\lambda (\alpha_y)_K] - \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}}, \quad (14)$$

где $\lambda = \sqrt{1 + \frac{2h_K}{(\alpha_y)_K}}$ — поправка на пластическую деформацию.

Следует отметить, что при использовании изложенной методики определения E_m необходимо измерять упругопластическое сближение α с учетом упругой податливости прибора, которая сильно влияет на α и никак не сказывается на F , h и q . Эксперименты показали, что чем точнее рассчитана упругая податливость прибора, тем точнее будет определен E_m . В этом случае максимальное относительное отклонение значений E_m , найденных по диаграмме вдавливания, от E_m , определенных растяжением, не превышает $\pm 5\%$.

Таким образом, выполнив однократное кинетическое индентирование до нагрузки F_K с регистрацией диаграммы вдавливания, содержащей линии нагружения и разгрузки, можно определить: параметр $q = F_K / (h_K R)$, модуль нормальной упругости испытуемого материала E_m , условную твердость на пределе текучести HB_T и условный предел текучести $\sigma_{0.2}$. Изложенную методику легко автоматизировать и запрограммировать для выполнения по приведенным выше формулам. Это сделано авторами статьи с использованием автоматизированного прибора МЭИ-ТА, позволяющего регистрировать кинетические диаграммы вдавливания. Весь процесс однократного испытания с регистрацией диаграммы вдавливания и выдачей значений q , E_m , HB_T , $\sigma_{0.2}$ занимает не более трех минут.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марковец М. П. Построение диаграммы истинных напряжений по твердости и технологической пробе / Журнал технической физики. 1949. Т. XIX. Вып. 3. С. 371 – 382.
2. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.
3. Дегтярев В. И. Исследование диаграмм твердости и их связи с механическими свойствами металлов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1974. — 24 с.
4. Шабанов В. М. Разработка и внедрение метода определения комплекса физико-механических свойств материалов непрерывным вдавливанием. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1988. — 18 с.
5. Бакиров М. Б. Разработка методов и средств контроля механических свойств металла корпуса ВВЭР в процессе эксплуатации по твердости. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1990. — 28 с.
6. Бакиров М. Б., Потопов В. В. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2000. Т. 66. № 12. С. 35 – 44.
7. Матюнин В. М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 288 с.
8. Шабанов В. М. Сопротивление металлов начальной пластической деформации при вдавливании сферического индентора / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 6. С. 63 – 69.
9. Martens A., Heyn E. Vorrichtung zur vereinfachten Prufung der kugeldruckharte / Z. VDI. 1908. Bd. 52. N 43. S. 1719.
10. Дрозд М. С. Шариковая проба, не зависящая от условий испытаний / Заводская лаборатория. 1958. Т. 24. № 1. С. 74 – 82.
11. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.
12. Пилипчук Б. И. Обзор теорий твердости. — М. – Л.: Стандартиз, 1962. — 112 с.
13. Матюнин В. М. Методика определения напряжения в области перехода упругой деформации в упругопластическую при растяжении образцов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 5. С. 54 – 57.
14. Матюнин В. М. Критические нагрузки и параметры отпечатка в начальной стадии пластического контакта шара с плоской поверхностью металла / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 4. С. 62 – 65.
15. Матлин М. М. Методика оперативного контроля модуля нормальной упругости / Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Физико-механические свойства материалов и их экспрессная оценка неразрушающим методом и портативными средствами». — Волгоград: ВГТУ, 1995. С. 27 – 29.

REFERENCES

1. Markovets M. P. Stress – strain diagram forming using the hardness values and technological sample test / Zh. Tekhn. Fiz. 1949. Vol. XIX. Issue 3. P. 371 – 382 [in Russian].
2. Markovets M. P. Determination of metals mechanical properties using the hardness values. — Moscow: Mashinostroenie, 1979. — 191 p. [in Russian].
3. Degtyarev V. I. The investigation of hardness diagrams and their relations with metals mechanical properties. Author's abstract of candidate's thesis. — Moscow, 1974. — 24 p. [in Russian].
4. Shabanov V. M. Development and implementation of materials mechanical properties determination method using the depth sensing indentation. Author's abstract of candidate's thesis. — Moscow, 1988. — 18 p. [in Russian].
5. Bakirov M. B. Development of methods and devices for metal mechanical properties control of VVER-type nuclear reactor. Author's abstract of candidate's thesis. — Moscow, 1990. — 28 p. [in Russian].
6. Bakirov M. B., Potapov V. V. Phenomenological method for mechanical properties control of steels for VVER-type nuclear reactor using the depth sensing indentation test diagrams / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2000. Vol. 66. N 12. P. 35 – 44 [in Russian].
7. Matyunin V. M. Indentation as the materials mechanical properties diagnostics method. — Moscow: Izdatel'skii dom MII, 2015. — 288 p. [in Russian].
8. Shabanov V. M. Metals initial plastic strain resistance during the spherical indentation test / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2008. Vol. 74. N 6. P. 63 – 69 [in Russian].
9. Martens A., Heyn E. Vorrichtung zur vereinfachten Prufung der kugeldruckharte / Z. VDI. 1908. Bd. 52. N 43. S. 1719.
10. Drozd M. S. Spherical probe test independent on test conditions / Zavod. Lab. 1958. Vol. 24. N 1. P. 74 – 82 [in Russian].
11. Drozd M. S., Matlin M. M., Sidiyakin Yu. I. Engineering calculations for elastic-plastic contact strain. — Moscow: Mashinostroenie, 1986. — 224 p. [in Russian].
12. Pilipchuk B. I. Hardness theories review. — Moscow – Leningrad: Standartgiz, 1962. — 112 p. [in Russian].
13. Matyunin V. M. Determination of stress corresponding for conversion of elastic strain into elastic-plastic strain / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 5. P. 54 – 57 [in Russian].
14. Matyunin V. M. Critical loads and indent parameters on initial stages of plastic contact of spherical indenter and flat metal surface / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 4. P. 62 – 65 [in Russian].
15. Matlin M. M. Express method of elastic modulus / Abstracts of All-Russian Science Conference "Express methods of materials physical and mechanical properties determination using the portable devices." — Volgograd: VGTU, 1995. P. 27 – 29 [in Russian].