

УДК 621.01:620.17

Новый подход к определению деформации при упругопластическом внедрении сферического индентора

П.М. Огар^а, Д.Б. Горохов^б

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^аogar@brstu.ru, ^бgorokhov@brstu.ru

Статья поступила 18.10.2015, принята 7.11.2015

Несмотря на значительные различия в оценке величины деформации при вдавлении сферы, которую приводят разные авторы, им, тем не менее, удается получать удовлетворительные результаты в определении механических свойств по параметрам твердости, что создает несколько абсурдную ситуацию. В основу нового метода определения деформации при вдавлении сферы положен энергетический подход. Метод базируется на допущении о том, что в пределах равномерной деформации при одноосном растяжении и вдавлении шара на пластическое вытеснение части объема материала за пределы исходного объема при одинаковой деформации затрачивается одинаковая удельная энергия. Показано, что для одноосного растяжения удельная энергия изменения объема равна истинному напряжению. При вдавлении сферы удельная энергия пластического вытеснения материала равна энергетической твердости. Получены выражения для определения деформации при вдавлении сферы, представлены соответствующие графические зависимости.

Ключевые слова: диаграмма вдавливания; вдавливание сферы; деформация; диаграмма растяжения; деформация при растяжении; конечно-элементное моделирование; удельная энергия; вытеснение материала.

New approach for strain determination under elastic-plastic spherical indenter

P.M. Ogar^a, D.B. Gorokhov^b

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^aogar@brstu.ru, ^bgorokhov@brstu.ru

Received 18.10.2015, accepted 7.11.2015

Despite significant differences in estimating the strain magnitude under sphere indentation which some authors give, they manage to obtain satisfactory results in determining mechanical properties of hardness, which creates an absurd situation. The basis of a new method for strain determination under sphere indentation is energy approach. The method is based on the assumption that within uniform strain under uniaxial tensile strain and ball indentation, the same specific energy is consumed on the plastic displacement of the material volume beyond the initial volume of the material. It is shown that for the uniaxial tension the specific energy of the volume change is equal to the true stress. Under sphere indentation, the specific energy of the plastic displacement is equal to the energy hardness. The equations for determination of the strain under sphere indentation are obtained, the corresponding graphic dependences are shown.

Key words: indentation diagram; sphere indentation; strain; tension diagram; tension strain; finite-element modeling; specific energy; material displacement.

Введение. Актуальность тематики обусловлена тем, что вопрос об оценке величины деформации при вдавлении сферического индентора и ее взаимосвязи с деформацией при растяжении является ключевым при разработке методов безобразного определения свойств материалов по параметрам твердости [1]. Абсурд ситуации состоит в том, что, несмотря на значительные различия в оценке величины деформации при вдавлении сферы, представленной ниже, авторами получены удовлетворительные результаты в определении механических свойств по параметрам твердости.

По существу, работа является дополнением к предыдущей публикации авторов [2].

Для описания истинных напряжений при растяжении (сжатии) в настоящее время широко используется степенной закон Холломоны (*Hollomon's power law*):

$$S = \begin{cases} E\varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_y; \\ E\varepsilon_y^{1-n}\varepsilon^n, \varepsilon \geq \varepsilon_y; \end{cases} \quad (1)$$

где E — модуль упругости; ε — деформация при растяжении (сжатии); $\varepsilon_y = \sigma_y/E$, $\sigma_y = S_y$ — предел текучести.

Для удобства дальнейшего изложения материала приведем краткий обзор выражений. По данным Д. Тейбора, деформация при внедрении сферы:

$$\epsilon_R = 0,2 \frac{d}{D} = 0,2 \frac{a_c}{R} = \beta \sin \gamma, \quad (2)$$

где $d = 2a_c$ — диаметр отпечатка; $D = 2R$ — диаметр индентора; $\beta = 0,2$; γ — половина угла вдавливания индентора в материал.

Соответствующее напряжение описывается выражением:

$$\sigma_t = \frac{p_m}{\Psi}, \quad (3)$$

где p_m — среднее давление; Ψ — ограничивающий фактор (для идеально пластического тела $\Psi = 3$).

В работе [4] авторами было предложено:

$$\epsilon_R = \alpha t g \gamma, \quad (4)$$

где $\alpha \approx 0,14$.

Средняя степень деформации при вдавливании шара в плоскость по Марковцу [5]:

$$\Psi_n = \frac{t}{D} = 0,5 \left(1 - \sqrt{1 - (d/D)^2} \right), \quad (5)$$

где t — величина внедрения шара.

Выражение (5) использовано также для определения деформации В.М. Шабановым [6].

В работах В.М. Матюнина с соавторами [7–8] для количественной оценки средней пластической деформации применялись следующие выражения:

$$\Psi^{60} = \frac{t}{D} = 1 - \sqrt{1 - (d/D)^2}. \quad (6)$$

Между $(d/D)_g$ на пределе прочности и индексом Майера существует однозначная связь [8]:

$$\left(\frac{d}{D} \right)_g = \frac{[m(m-2)]^{0,5}}{m-1}. \quad (7)$$

Такая же связь наблюдается в работах С.И. Булычева с соавторами [9–11], где при исследовании корреляции диаграмм твердости и растяжения исходят из эмпирического закона Майера. При этом деформация описывается в зависимости:

$$\epsilon = \alpha (d/D)^\beta, \quad (8)$$

где α, β — параметры, зависящие от $(m-2)$.

В работах [12; 13] автором был сделан вывод, что деформацию следует рассчитывать по формуле:

$$\epsilon = k_\epsilon \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (9)$$

где $k_\epsilon = 0,11$, h — величина внедрения.

Для оценки характеристик упрочняемого материала методом сферического индентирования в последние годы широко используется конечно-элементный анализ [14–18]. В указанных работах искомые параметры, как правило, являются функциями от ϵ_y, n (см. выражение

(1)) и отношения $\bar{h} = h_r = h/R$, где h — величина внедрения сферы от уровня исходной поверхности.

Следует отметить недавнюю работу [19], в которой аналитически получено для выражения (2) $\beta = 0,25$ и для выражения (3) $\Psi = \Psi(\epsilon_y, n, a/R)$.

Описание метода. Метод основывается на допущении о том, что в пределах в пределах равномерной деформации при одноосном растяжении и вдавливании шара на пластическое вытеснение части объема материала за пределы исходного объема при одинаковой деформации затрачивается одинаковая удельная энергия.

Для одноосного растяжения при приложении нагрузки P образец с начальной длиной l_0 и сечением F_0 удлиняется на величину Δl , а сечение становится равным F . Удельная энергия изменения объема равна отношению выполненной работы $A_p = P \Delta l$ к вытесненному объему материала $\Delta V = F \Delta l$:

$$\Delta E = \frac{A_p}{\Delta V} = \frac{P}{F} = S, \quad (10)$$

где S — истинное напряжение.

При вдавливании сферы удельная энергия пластического вытеснения материала равна энергетической твердости [20]:

$$\frac{H_E}{E^*} = C_p \cdot \frac{\bar{P}}{h}, \quad (11)$$

где:

$$\bar{P} = \frac{P}{E^* R^2} = (\bar{h})^A \cdot e^{-B}; \quad (12)$$

$\bar{h} = h/R$; $A = A(\epsilon_y, n)$, $B = B(\epsilon_y, n)$ — коэффициенты [18]; C_p — определяется согласно [20].

Из выражения (11):

$$H_E(\epsilon_y, n, \bar{h}) = E^* C_p(\epsilon_y, n, \bar{h}) \cdot \frac{\bar{P}(\epsilon_y, n, \bar{h})}{h}. \quad (13)$$

При вдавливании сферы только часть энергии Ψ_e затрачивается на пластическое вытеснение материала от уровня исходной поверхности. Согласно принятому допущению:

$$S = \frac{H_E}{\Psi_e}, \quad \Psi_e = \frac{H_E}{S}. \quad (14)$$

При $\epsilon = \epsilon_u = n$ (в зарубежной литературе равномерная деформация ϵ_p обозначается ϵ_u):

$$\Psi_e(\epsilon_y, n, \bar{h}) = \frac{E^* C_p(\epsilon_y, n, \bar{h}_g) \bar{P}(\epsilon_y, n, \bar{h}_g)}{E \epsilon_y^{1-n} \epsilon_u^n \bar{h}_g}, \quad (15)$$

где \bar{h}_g определяется из выражения:

$$\left(\frac{a}{R}\right)_g = \sqrt{2c^2(\varepsilon_y, n, \bar{h}_g)\bar{h}_g - (c^2(\varepsilon_y, n, \bar{h}_g)\bar{h}_g)^2}. \quad (16)$$

Параметр $c^2(\varepsilon_y, n, \bar{h}_g)$ определяется согласно [16].

Для определения $(a/R)_g = (d/D)_g$ следует использовать выражение (7).

Используя выражения (14) и (15), в итоге получим следующее выражение для определения деформации:

$$\varepsilon(\varepsilon_y, n, \bar{h}) = \varepsilon_u \cdot \left(\frac{C_p}{(C_p)_g}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\bar{h}}{\bar{h}_g}\right)^{\frac{A(\varepsilon_y, n)-1}{n}}, \quad (17)$$

где $(C_p)_g = C_p(\bar{h}_g)$.

При $\bar{h} = \bar{h}_g$ имеем $\varepsilon = \varepsilon_u$.

Выражение (17) можно также представить в виде:

$$\varepsilon(\varepsilon_y, n, \bar{h}) = \varepsilon_u \cdot \left(\frac{H_E(\varepsilon_y, n, \bar{h})}{H_E(\varepsilon_y, n, \bar{h}_g)}\right)^{\frac{1}{n}}. \quad (18)$$

На рис. 1 сплошными линиями представлены зависимости деформации ε от относительного внедрения сферы \bar{h} для разных значений характеристик материала ε_y и n . Комбинации значений ε_y и n выбраны такими же, как в работе [2]. Результаты расчетов по методике [2] приведены точками.

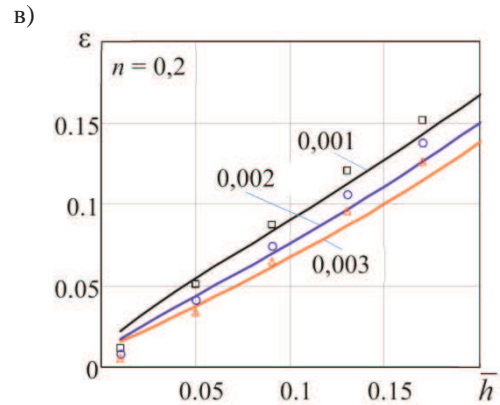
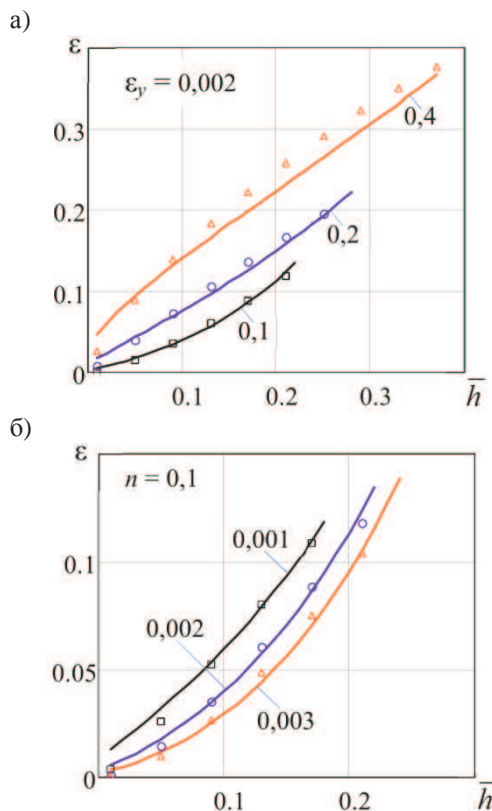


Рис. 1. Зависимости деформации ε от относительного внедрения сферы \bar{h} для разных значений ε_y и n .

Заключение

1. Несмотря на разные подходы и различие расчетных выражений в сравнения с данными [2], получены близкие результаты.

2. В отличие от результатов работы [2] индекс Майера m не входит в расчетные формулы в явном виде, он используется только для определения $(a/R)_g$.

3. Вопрос требует дополнительных исследований, особенно при деформациях, соответствующих пределу текучести материала.

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания № 2014/10 на 2015 г. (проект № 1754).

Литература

1. Матюнин В.М. Методы и средства безобразцовой оперативной оценки механических свойств материалов элементов конструкций и машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: 1993. 36 с.
2. Огар П.М., Горохов Д.Б. Обзор методов определения упругопластической деформации при внедрении сферы // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 3. С. 15-22.
3. Tabor D. The Hardness of Metals. Oxford: Clarendon Press, 1951.
4. Ahn J.-H., Kwon D. Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect // J. Mater. Res. 2001. v. 16. pp. 3170-3178.
5. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.
6. Шабанов В.М. Экспресс-диагностика технического состояния металла элементов конструкций АЭС методом кинетического индентирования // Технологии техногенной безопасности. 2013. № 3 (39). С. 1-7.
7. Матюнин В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 214 с.
8. 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.
9. Булычев С.И. Переход от диаграмм вдавливания к диаграммам растяжения с учетом упрочненного поверхностного слоя // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 2. С. 43-48.
10. Булычев С.И. Твердость и гистерезис на пределе текучести // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 41-45.

11. Булычев С.И., Кравченко А.Н. Новые параметры подбора при переходе от диаграмм вдавливания к диаграмм растяжения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 2. С. 49-54.

12. Ковалев А.П. Основные закономерности вдавливания сферического индентора и оценка физико-механических свойств поверхностного слоя деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 1. С. 36-41.

13. Ковалев А.П. Оценка несущей способности поверхностного слоя деталей вдавливанием сферического индентора // Технологии машиностроения. 2007. № 9. С. 50-53.

14. Cao Y.P., Lu J. A new method to extract the plastic properties of metal materials from an instrumented spherical indentation loading curve // Acta Materialia. 2004. Vol. 52. P. 4023-4032.

15. Lee H., Lee J.H., Pharr G.M. A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2005. Vol. 53. P. 2037-2069.

16. Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., El Abdi R., Mauvoisin G. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation // International Journal of Solids and Structures. 2006. № 43. P. 4136-4153.

17. Kim S.H., Lee B.W., Choi Y., Kwon D. Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials-a FEM study // Materials Science and Engineering A. 2006. V 415. P. 59-65.

18. Collin J.M., Mauvoisin G, Pilvin P. Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches // Materials and Design. 2010. Vol. 32. P. 636-640.

19. Kang S.-K., Kim Y.-C., Kim K.-H., Kim J.-Y., Kwon D. Extended expanding cavity model for measurement of flow properties using instrumented spherical indentation. // International Journal of Plasticity, 49 (2013). pp. 1-15.

20. Огар П.М., Тарасов В.А., Федоров И.Б. Энергетическая концепция твердости при кинетическом индентировании сферой // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 36-41.

6. Shabanov V.M. Rapid diagnosis of the technical state of the metal structural elements of NPP using kinetic indentation method // Technologies of technological safety. 2013. № 3 (39). P. 1-7.

7. Matyunin V.M. Express-diagnosis of mechanical properties of constructional materials. М.: MEI Publishing House, 2006. 214 P.

8. Matyunin V.M., Dubov A.A., Marchenkov A.Y. General regularities of manifestation of the scale factor in determining the strength and hardness of the metal // Industrial Laboratory. Diagnosis materials. 2010. V. 76. № 8. P. 43-47.

9. Bulychev S.I. Transition from indentation diagrams to stress-strain diagrams taking into consideration hardened surface layer // Deformation and fracture of materials. 2010. № 2. P. 43-48.

10. Bulychev S.I. Hardness and hysteresis at the yield strength // Deformation and fracture of materials. 2011. № 1. P. 41-45.

11. Bulychev S.I., Kravchenkov A.N. New Similarity Parameters in Transition from Indentation Diagrams to Tensile Diagrams // Industrial Laboratory. Diagnosis materials. 2014. V. 80. № 2. P. 49-54.

12. Kovalev A.P. Basic laws of the indentation of a spherical indenter and evaluation of physical and mechanical properties of the surface layer parts // Hardening technology and coating. 2007. № 1. P. 36-41.

13. Kovalev A.P. Evaluation of the bearing capacity of the surface layer of details of a spherical indenter indentation // Technology of mechanical engineering. 2007. № 9. P. 50-53.

14. Cao Y.P., Lu J. A new method to extract the plastic properties of metal materials from an instrumented spherical indentation loading curve // Acta Materialia. 2004. Vol. 52. P. 4023-4032.

15. Lee H., Lee J.H., Pharr G.M. A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2005. Vol. 53. P. 2037-2069

16. Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., El Abdi R., Mauvoisin G. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation // International Journal of Solids and Structures. 2006. № 43. P. 4136-4153.

17. Kim S.H., Lee B.W., Choi Y., Kwon D. Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials-a FEM study // Materials Science and Engineering A. 2006. V 415. P. 59-65.

18. Collin J.M., Mauvoisin G, Pilvin P. Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches // Materials and Design. 2010. Vol. 32. P. 636-640.

19. Kang S.-K., Kim Y.-C., Kim K.-H., Kim J.-Y., Kwon D. Extended expanding cavity model for measurement of flow properties using instrumented spherical indentation. // International Journal of Plasticity, 49 (2013). pp. 1-15.

20. Огар П.М., Тарасов В.А., Федоров И.Б. Power concept of hardness under the kinetic spherical indentation // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 2 (22). P. 36-41.

References

1. Matyunin V.M. Methods and tools for specimenless operational estimation of mechanical properties of materials and constructional elements of machines: Author. diss. ... Dr. techn. Sciences. М.: 1993. 36 pp.

2. Ogar P.M., Gorokhov D.B. Review of methods for determining the elastic-plastic strain in the sphere indentation // Systems. Methods. Technologies. 2015. №3. P. 15-22.

3. Tabor D. The Hardness of Metals. Oxford: Clarendon Press, 1951.

4. Ahn J.-H., Kwon D. Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect // J. Mater. Res. 2001. v. 16. pp. 3170 - 3178.

5. Markovets M.P. Determination of mechanical properties of metals hardness. М.: Mashinostroenie, 1979. 191 p.