

УДК 620.178.152.28

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УПРОЧНЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИМ НАКОНЕЧНИКОМ

Доронин К. И.¹, Уманский А. С.¹, Гоголинский К. В.²¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Санкт-Петербург, Российская Федерация

²НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Гатчина, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассмотрены особенности моделирования процесса индентирования сферическим индентором при различных коэффициентах упрочнения n исследуемого материала. С помощью метода конечных элементов получены диаграммы индентирования материала с заданными свойствами, близкими к стали Ст3. Выявлено изменение расчетных значений твердости и модуля упругости при увеличении значения n . Получены значения n , при которых упругие свойства в виде модуля упругости при индентировании E_{IT} наиболее совпадают с заданным значением в 200 ГПа. Построены профили сечения зоны индентирования для различных n .

Ключевые слова: инструментальное индентирование, компьютерное моделирование, модуль упругости.

INFLUENCE STUDY OF THE HARDENING EXPONENT ON THE RESULTS OF SIMULATED INSTRUMENTED INDENTATION TEST WITH A SPHERICAL TIP

Doronin K.¹, Umanskii A.¹, Gogolinskii K.²¹Saint Petersburg Mining University

St. Petersburg, Russian Federation

²NRC "Kurchatov Institute" – PINP

Gatchina, Russian Federation

Abstract. The paper examines the features of modeling the process of indentation by a spherical indenter at various strain hardening exponent n of the material under the study. Indentation curves for a material with specified properties close to St3 steel were obtained using the finite element method. Difference in calculated hardness and Young's modulus with increasing n value was revealed. The values of n were identified at which the elastic properties in the form of indentation modulus E_{IT} most closely coincide with the specified value of 200 GPa. The cross-sectional profiles of the indentation zone were built for different n .

Key words: instrumented indentation, computer simulation, Young's modulus.

Адрес для переписки: Доронин К. И., 21-я линия В. О., 2, г. Санкт-Петербург 199106, Российская Федерация, e-mail: doronin.k.i@mail.ru

Введение. При компьютерном моделировании процессов деформации ключевую роль играет описание поведения материала при определенной нагрузке. В случае моделирования процесса индентирования важно учитывать функцию упрочнения материала, так как при индентировании возникают напряжения, превышающие предел текучести материала σ_y . Возможности метода конечных элементов применительно к задачам моделирования процесса контактного взаимодействия позволяют оценить такие явления как навал и прогиб в зоне деформации. В дальнейшем это позволит учесть влияние указанных факторов при разработке методик обработки экспериментальных данных при измерении механических свойств методами инструментального индентирования (ИИ).

Методы. Для решения задачи моделирования контактного взаимодействия при индентировании применяется метод конечных элементов (МКЭ) в среде COMSOL Multiphysics. Решение осуществляется временным решателем для осесимметричной геометрии. Для описания поведе-

ния материала при деформации используется модель степенного закона, также используемая в решениях задач индентирования в работах [1, 2] и представленная в формуле (1). В процессе моделирования сравнивается поведение материала при различных коэффициентах упрочнения $n = [0,0-1,0]$ с шагом 0,1. Для испытуемого материала заданы модуль упругости $E = 200$ ГПа и предел текучести $\sigma_y = 250$ МПа.

$$\sigma = K\varepsilon^n \text{ при } \varepsilon > \varepsilon_y, \quad (1)$$

где K – константа материала; ε_y – деформация при пределе текучести; n – коэффициент упрочнения.

Контактная глубина h_c для расчета твердости H_{IT} и модуля упругости E_{IT} при ИИ вычисляется двумя способами. Первый основывается на расчете глубины при индентировании шаром и описывается формулой (2) [3, 4].

$$h_c = (h_{max} + h_f) / 2, \quad (2)$$

где h_{max} – максимальная глубина внедрения относительно поверхности материала, h_f – остаточная глубина, при которой нагрузка уже отсутствует.

Второй способ основан на построении касательной в области разгрузки (метод Оливера-Фарра) [5]. В таком случае используется формула (3).

$$h_c = h_{max} - \varepsilon (h_{max} - h_r), \quad (3)$$

где h_r – точка пересечения касательной с осью глубины h , ε – коэффициент, учитывающий форму индентора. Для сферического индентора $\varepsilon = 0,75$. Применимость разных способов обоснована в [6].

Результаты. Построенные в процессе моделирования диаграммы индентирования представлены на рисунке 1. Значения по глубине индентирования нормированы относительно h_{max} для визуальной демонстрации изменения угла наклона этапа разгрузки. Действительная глубина же уменьшалась с увеличением n 1057 нм до 586 нм соответственно. Расчет твердости H_{IT} представлены в таблице 1 (справочное значение твердости для аналогичного материала Ст3 – 131 НВ $\approx 1,3$ ГПа).

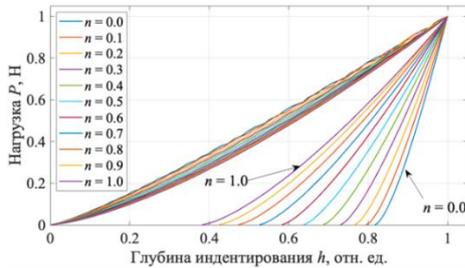


Рисунок 1 – Диаграммы индентирования $P(h)$

Таблица 1 – Твердость H_{IT} , ГПа в зависимости от способа расчета для некоторых n

n	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$h_c (h_f)$	0,83	0,98	1,19	1,45	1,72	1,96
$h_c (h_r)$	0,85	1,01	1,24	1,53	1,84	2,09

Изменение угла наклона этапа разгрузки влияет на вычисление модуля упругости. Результаты его расчета относительно двух способов представлены в таблице 2. Для обоих методов демонстрируется снижение расчетных значений модуля упругости при возрастании n , однако расчет через остаточную глубину h_r фиксирует большую ошибку относительно опорного значения 200 ГПа (максимальное относительно отклонение 23 % против 16 %). При этом ошибка в классическом методе Оливера-Фарра ($h_c(h_r)$) при МКЭ также выявлена в [7], где наблюдается завышение модуля упругости.

Таблица 2 – Модуль упругости E_{IT} , ГПа в зависимости от способа расчета для некоторых n

n	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$h_c (h_f)$	246	235	223	208	196	190
$h_c (h_r)$	202	186	176	169	168	168

При анализе профилей индентирования использовалась геометрия после разгрузки. Профили сечения зоны индентирования для разных n представлены на рисунке 2. Для обеспечения сравнения данные глубины индентирования нормированы в соответствии с [3]: z/h для оси сим-

метрии z и r/a для радиальной координаты r , где a – радиус контакта при индентировании. Такая форма профилей индентирования сходится с [8] и имеет общий вид увеличения навала при уменьшении n . Явление навала четко идентифицируется при $n < 0,3$.

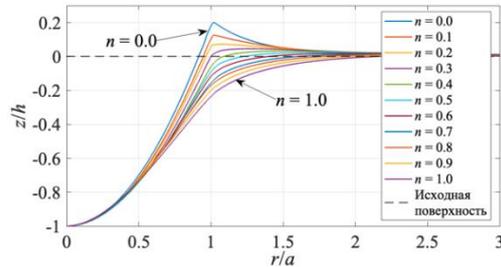


Рисунок 2 – Сечение зоны индентирования

Выводы. Полученные результаты позволяют оценить зависимость расчетных механических свойств по методу ИИ при увеличении коэффициента упрочнения n . Зависимость для твердости имеет монотонно возрастающий характер, для модуля упругости – монотонно убывающий. Построенная модель может быть использована для анализа контактно-ударного взаимодействия. В этом случае потребуется более точная оценка профилей зоны индентирования в момент максимальной нагрузки P_{max} .

Литература

- Long, X. Critical Review of Nanoindentation-Based Numerical Methods for Evaluating Elastoplastic Material Properties / X. Long, R. Su, Y. Dong, C. Chang, // Coatings. – 2023. – V. 13. – P. 1334.
- Destructive Hardness Indentation Measurement of Residual Stress on Large Aerospace Forged Components at the Engineering Site Based on Impact Hardness Tester / J. Niu // Materials. – 2024. – V. 17. – P. 3436.
- Oliver, W. C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – V. 19. – P. 3–20.
- Крень, А. П. Определение физико-механических характеристик изотропного пирографита по параметрам динамического индентирования / А. П. Крень, Т. А. Протасеня // Дефектоскопия. – 2014. – № 7. – С. 51–59.
- Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – V. 7. – P. 1564–1583.
- Анализ способов расчета модуля упругости при динамическом инструментальном индентировании / К. В. Гоголинский // Дефектоскопия. – 2024. – № 7. – С. 72–76.
- Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters / J. L. Bucaille [et al.] // Acta Materialia. – 2003. – V. 51 (6). – P. 1663–1678.
- Li, Y. Crystal plasticity assessment of the effect of material parameters on contact depth during spherical indentation / Y. Li, W. Jiang, Ž. Božić // Continuum Mech. Thermodyn. – 2020. – V. 35. – P. 729–739.