

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛІ 15Х2НМФА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ІНДЕНТУВАННЯ

О. А. Каток, Є. О. Кондряков,
Р. В. Кравчук, В. В. Харченко.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

The mechanical characteristics of steel 15Kh2NMFA according to the diagram of uniaxial tension, obtained by the instrumented indentation method, were determined. It was shown that the deviation between the values of the strength characteristics, determined during indentation and tensile test, does not exceed 1%.

Вступ. Забезпечення надійної експлуатації та можливості продовження ресурсу відповідального обладнання в значній мірі залежить від коректності і точності визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів і їх зміни в процесі експлуатації. На теперішній час існує потреба в отриманні нових даних щодо процесів деформування та руйнування матеріалів корпусу реакторів і іншого відповідального обладнання АЕС з урахуванням реальних умов навантаження, визначення їх пошкоджуваності в процесі експлуатації.

З метою одержання більш повної і точної інформації про поведінку матеріалу під навантаженням в світі інтенсивно розвиваються інструментовані методи випробувань матеріалів і конструктивних елементів, які ґрунтуються на цифровій реєстрації параметрів всього процесу деформування. Важливе місце серед таких методів займає метод інструментованого індентування, відомий як метод кінетичної твердості [1-3]. На сьогодні цей метод активно розвивається, та широко використовується для визначення деградації конструкційних матеріалів, проте підвищення точності визначення характеристик механічних властивостей металів, як і раніше, залишається надзвичайно важливою і актуальною задачею механіки руйнування [4, 5].

Для підвищення достовірності поточного контролю механічних характеристик конструкційних матеріалів елементів обладнання на основі методів індентування більш доцільно застосовувати підхід відтворення діаграми розтягу металів за параметрами діаграми контактного деформування [6, 7].

Метою даної роботи є отримання методом інструментованого індентування діаграми одновісного розтягу сталі 15Х2НМФА з подальшим визначенням механічних характеристик матеріалу.

Методика та обладнання. Підхід відтворення діаграми розтягу металів за параметрами діаграми контактного деформування розділяють на два етапи. На першому етапі будують скінчено-елементну модель для чисельного моделювання процесу контактного деформування матеріалу стальною кулькою, метою якого є отримання діаграми інструментованого індентування. При вирішенні прямої задачі діаграма розтягу є наперед відомою. Апробацію прямої задачі здійснюють на модельному матеріалі, для якого експериментально визначають діаграми деформування зразків на розтяг і індентування. Задача вважається вирішеною при умові, що розбіжність діаграм інструментованого індентування, побудованих за результатами експериментальних випробувань і чисельного моделювання не перевищує 1 %.

На другому етапі експериментальна діаграма індентування є масивом даних для чисельного моделювання. Рішенням задачі є відтворення діаграми розтягу за допомогою розрахункової моделі побудованої на першому етапі. Задача вирішується наступним чином. За експериментальною діаграмою індентування визначають механічні характеристики матеріалу, за якими будують початкову діаграму розтягу металу. Отриману діаграму використовують для чисельного моделювання процесу інструментованого індентування. За результатами чисельного моделювання будують діаграму контактного деформування, яку

зіставляють із експериментальною. Якщо розбіжність між діаграмами інструментованого індентування, що побудовані за результатами експериментальних даних і чисельного моделювання не перевищує 1 %, то початкова діаграма розтягу металу вважається достовірною. В іншому разі початкову діаграму розтягу металу необхідно корегувати і проводити чисельне моделювання із відкоригованою діаграмою.

Побудова діаграми деформування металу корпусу реактора ВВЕР 1000 за результатами чисельного моделювання процесу індентування.

Рішення прямої задачі і детальний опис скінчено-елементної моделі для розрахунку контактного деформування матеріалу сталлю кулькою представлено в роботі [8]. У якості модельного матеріалу використовувалась конструкційна сталь 45.

Зворотню задачу вирішували для сталі 15Х2НМФА. Для визначення поточних значень механічних характеристик сталі 15Х2НМФА, яка широко застосовується для виготовлення відповідального обладнання АЕС (корпусів, кришок та інших вузлів реакторних установок) використано розроблені в ІПМіс імені Г.С. Писаренка НАН України методики та відповідне для їх реалізації обладнання [9 – 11]. Значення механічних характеристик, отримані методом інструментованого індентування, приведені нижче: границя міцності $\sigma_s = 748,0$ МПа, границя плинності $\sigma_{0,2} = 611,0$ МПа і модуль пружності $E = 1,92 \times 10^5$ МПа.

Початкову діаграму деформування зразків на розтяг будували за значеннями механічних характеристик, визначених за результатами індентування. Для побудови такої діаграми було розроблено спеціальне програмне забезпечення, що дозволило не тільки будувати діаграму розтягу за механічними характеристиками, визначеними методом інструментованого індентування, але й проводити її корегування в залежності від величини розбіжності між діаграмами інструментованого індентування, що побудовані за результатами експериментальних даних і чисельного моделювання.

Початкова діаграма деформування зразків на розтяг приведена на рис. 1, де також показано співставлення діаграм інструментованого індентування, побудованих за результатами експериментальних даних і чисельного моделювання. Видно, що значення максимального навантаження на індентор при моделюванні нижче дійсного значення. Відхилення між діаграмами на ділянці навантаження склало 4,5 %, на ділянці розвантаження – 3 %.

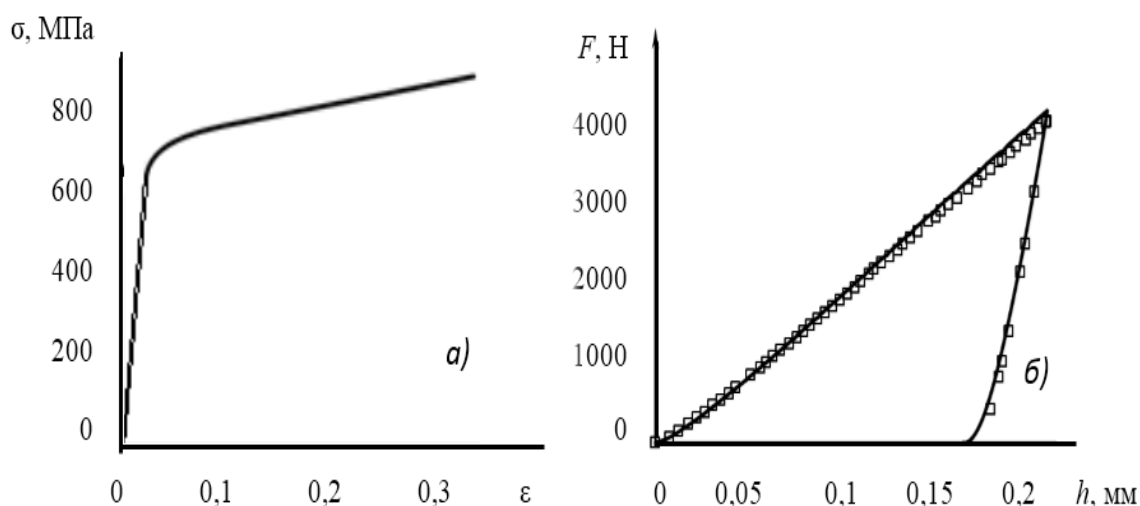


Рис.1. Початкова діаграма деформування зразків на розтяг (а) і співставлення діаграм інструментованого індентування (б), побудованих за результатами експериментальних даних (суцільна лінія) і чисельного моделювання (□).

Внаслідок значного відхилення між розрахунковими і експериментальними даними проводилось корегування початкової діаграми розтягу з врахуванням розбіжності між діаграмами індентування, що побудовані за результатами експериментальних даних і

чисельного моделювання. Корегування діаграми деформування зразків на розтяг проводили до тих пір, поки відхилення між діаграмами індентування не перевищувало 1 %. На рис. 2 приведені діаграми індентування сталі 15X2НМФА в координатах «навантаження F – глибина індентування h », побудовані за результатами експериментальних даних і чисельного моделювання з використанням відкорегованої діаграми розтягу на останній ітерації.

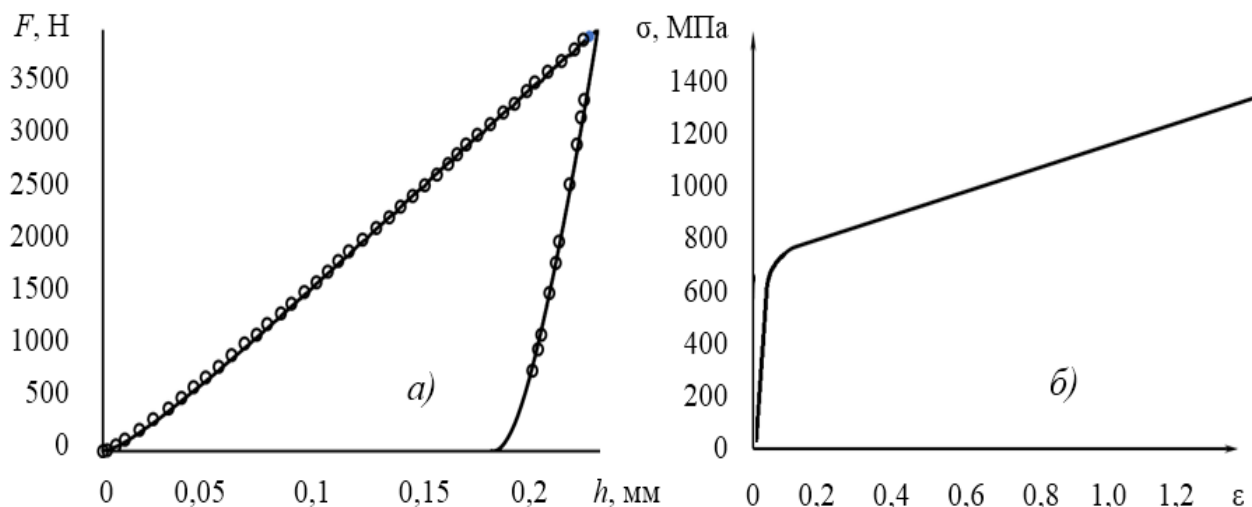


Рис.2. Діаграми контактного деформування сталі 15X2НМФА стальною кулькою в координатах «навантаження F – глибина індентування h » (а) побудовані за результатами експериментальних даних (суцільна лінія) і чисельного моделювання (\circ) з використанням відкорегованої діаграми розтягу на останній ітерації (б)

Діаграму одновісного розтягу металу корпусу реактора (сталь 15X2НМФА), отриману шляхом чисельного моделювання процесу індентування, показано на рис. 2 б. Значення характеристик механічних властивостей, визначених за діаграмою одновісного розтягу, отриманою методом інструментованого індентування та шляхом випробувань зразків на розтяг відповідно ГОСТ 1497-84, приведено в табл.1.

Таблиця 1. Порівняння характеристик механічних властивостей сталі 15X2НМФА, визначених різними методами.

Механічні характеристики	Значення, МПа		Похибка Δ , %
	ГОСТ 1497-84	Метод індентування	
Границя плинності, $\sigma_{0,2}$	640,5	638,1	0,4
Границя міцності, σ_e	724,2	728,4	0,6

Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що запропонована методика може успішно застосовуватись для контролю поточного стану конструкційних сталей елементів обладнання 1-го контуру АЕС.

Висновки. Із використанням створених методик і модернізованого експериментального обладнання для випробувань конструкційних матеріалів методом інструментованого індентування запропоновано підхід відтворення діаграми деформування зразків на розтяг за результатами таких випробувань. Зокрема експериментально отримано діаграму одновісного розтягу сталі 15X2НМФА. Завдяки цьому, відхилення між значеннями

характеристик міцності, визначеними при індентуванні і випробуванні на розтяг, не перевищує 1 %.

Література

1. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002 – [чинний від 2002].
2. Матюнин В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. – М: Издательский дом МЭИ, 2006. – 214с.
3. Бакиров М. Б. Разработка расчетно-экспериментальных методик получения механических характеристик на основе метода кинетического индентирования / М. Б. Бакиров, В. В. Потапов, И. В. Фролов // Мир измерений. – 2006. – № 8. – С. 5 – 11. – библиогр.: 11.
4. Кинетическое индентирование в пробе неразрушающего контроля и диагностики материалов / Алехин В. П., Булычев С. И., Калмакова А. В. [и др.] // Завод. лаб. – 2004. – Том 70. – № 6. – С. 46 – 51. – библиогр.: 51.
5. Каток О. А., Рудницкий Н. П., Швец В. П., Харченко В.В., Бажуков А. В., Мельник П. Е. К определению механических характеристик сталей по результатам испытаний на твердость // Проблем прочности. №6 (432). – 2014. – с.66 – 70.
6. Dao M. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation / M. Dao, N. Chollacoop, K. J. Van Vliet [et ell] // Acta Materialia. – 2001. – 49. – P. 3899 – 3918. – Библиогр.: с. 3917.
7. Исследование возможности восстановления диаграмм деформирования с помощью нейросетевого подхода / М. Б. Бакиров, О. А. Мишулина, И. А. Киселев [и др.] // Завод. лаб. – 2010. – Том 76. – №7. – С. 42 – 48. – библиогр.: 47 – 48.
8. Каток О. А. Численное моделирование процесса непрерывного индентирования / О. А. Каток, С. В. Лензион, В. В. Харченко // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 29. – С. 167 – 173. – Библиогр.: с. 172–173.
9. Переносний прилад для визначення характеристик міцності металів методом інструментованого ідентування/ В. В. Харченко, О. А. Каток, О. В. Дроздов [та ін.] // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2009. – Вып. 32. – С. 162 – 168. – Библиогр.: с. 167–168.
10. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования / В. В. Харченко, Н. П. Рудницкий, О. А. Каток [и др.] // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 28. – С. 140–147. – Библиогр.: с. 147.
11. Каток О. А., Харченко В. В., Дроздов А. В., Панасенко А. В. Определение механических свойств сталей методом непрерывного индентирования // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2008. – Вып. 31. – С. 208 – 213.