

УДК 539.43

Оцінка граничного стану сталі 20 в умовах малоциклового навантаження з використанням методу LM-твердості

Булах П.О., Швець В.П., Масло О.М.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Експрес-діагностика стану матеріалу елементів конструкцій, що знаходяться в експлуатації, а також матеріалів, що є сировиною для виготовлення відповідальних елементів обладнання, пов'язана з необхідністю врахування поточної пошкоджуваності. Особливу актуальність, при цьому, мають неруйнівні методи контролю стану металу, що дозволяють оцінити рівень наявних в матеріалі розсіяних пошкоджень та ступінь деградації його структури. Іншим важливим фактором контролю поточного стану матеріалу є можливість оцінки залишкового ресурсу елемента конструкції при експлуатаційних навантаженнях.

В даній роботі представлено результати досліджень з застосування неруйнівного методу LM-твердості при оцінці характеристик граничного стану матеріалу натурних елементів конструкцій, що працюють в умовах малоциклового навантаження.

Ключові слова "граничний стан; малоциклове навантаження; неруйнівний контроль; пошкоджуваність; метод LM-твердості"

Проведено експериментальні дослідження кінетики пошкоджуваності дозволяють виділити основні граничні стани, яких досягає матеріал в процесі навантаження, пов'язані з настанням текучості (появою незворотніх деформацій) та руйнування.

Визначення параметрів гомогенності при досягненні граничного стану текучості при повторно-статичному одновісному розтязі сталі 20 проводилось за методикою, запропонованою в [1, 2] При навантажуванні зразка до заданого рівня деформації виконувалися масові виміри твердості HRB матеріалу зразка, що знаходиться в навантаженому і розвантаженому станах, за якими розраховувалися параметри розсіювання значень твердості - коефіцієнти гомогенності Вейбулла m . Отримані результати експериментальних досліджень показують, що дія розтягуючих напружень призводить до зниження опору матеріалу проникненню індентора і збільшенню розсіювання значень твердості та зниженню коефіцієнта m . В ході повторного статичного розтягу до рівнів залишкової деформації 3% і 6% виконувалося по 30 вимірювань твердості. За результатами вимірювань проводилася оцінка стану пошкодження металу за методом LM- твердості (табл.1).

Таблиця 1. Зміна твердості і коефіцієнта гомогенності сталі в залежності від деформованого стану

Параметр	Вихідний стан	$\epsilon_{ост}$	
		3%	6%
HRB	79,5	80,4	80,8
m	215	90,5	85,3

З отриманих експериментальних даних слідує що однорідність структури матеріалу, що характеризується коефіцієнтом гомогенності m , на початковому етапі пластичного деформування суттєво відрізняється від однорідності матеріалу у вихідному стані, проте не зазнає помітних змін до рівня остаточних деформацій $\epsilon_{ост} = 6\%$. Це дозволяє припустити, що значення коефіцієнту гомогенності m , отримані при значеннях остаточної деформації до $\epsilon_{ост} = 3\%$, є такими, які відповідають досягненню граничного стану текучості матеріалу (рис.1).

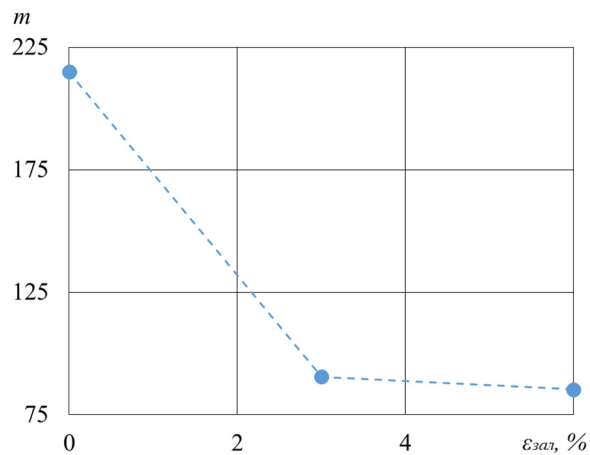


Рис. 1. Залежність коефіцієнта гомогенності m від залишкової деформації $\varepsilon_{\text{зал}}$ при повторно-статичному навантаженні сталі 20

Дослідження граничного стану, що відповідає руйнуванню при статичному та довготривалому циклічному навантаженні проводились для сталі 20 у двох станах – умовно непошкодженому вихідному стані та з експлуатаційним напрацюванням 200 тис. годин. При проведенні даних досліджень реалізовувалася програма, що передбачала пластичну деформацію зразків одновісним розтягом і випробувань на твердість у робочій частині зразка (у зоні рівномірної деформації) в початковому стані і після того, як матеріал зазнав руйнування, тобто досяг максимального рівня пластичної залишкової деформації ε [1].

Випробування проводили на зразках вирізаних в осьовому напрямку з труб зі сталі 20, а саме з труби, що не перебувала в експлуатації (вважалось, що матеріал перебуває у вихідному непошкодженому стані), та з труби, яка мала попереднє експлуатаційне напрацювання 200 тис. годин. Середні значення твердості і коефіцієнтів гомогенності для матеріалу відповідно склали: для початкового стану $HB \approx 143$, $m \approx 49,5$; для матеріалу з напрацюванням $HB \approx 156$ і $m \approx 39,5$. З попередніх даних видно, що твердість матеріалу початкового стану несуттєво нижче ніж з напрацюванням, у той же час матеріал в початковому стані більш однорідний, про що свідчать вищі значення коефіцієнтів гомогенності m (табл.2, рис.2).

Таблиця 2. Твердість за Брінелем (НВ) та коефіцієнт гомогенності m зразків вирізаних із труб в початковому стані та напрацюванням 200 тис. год

	Вихідний стан				Напрацювання 200 тис. годин			
	1	2	3	4	5	6	7	8
НВ	144,2	149,7	136,0	142,4	155,7	158,0	156,9	155,9
m	47,4	47,3	45,2	57,5	32,5	40,4	41,3	43,8

Напрацювання привело до незначної деградації стану матеріалу, про що свідчать значення коефіцієнтів гомогенності, але визначення довговічності в даному випадку є досить складною задачею (рис.2).

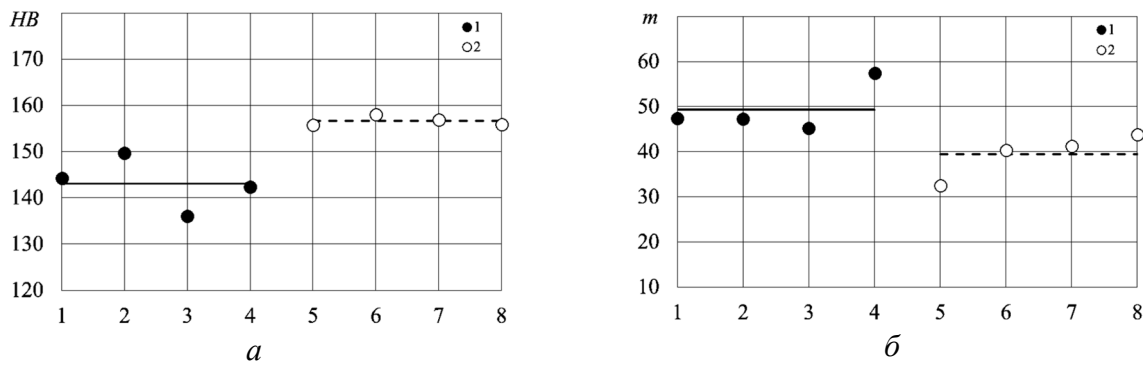


Рис. 2. Твердість (а) та коефіцієнти гомогенності (б) вибірки зразків із сталі 20 перед випробуванням: 1 – вихідний стан (зразки №1-4), 2 - напрацювання 200 тис. год (зразки №5-8)

Існуючі уявлення про деградацію структури матеріалів при циклічному навантаженні [3, 4] дозволяють стверджувати, що в загальному випадку на кривій пошкоджуваності можна

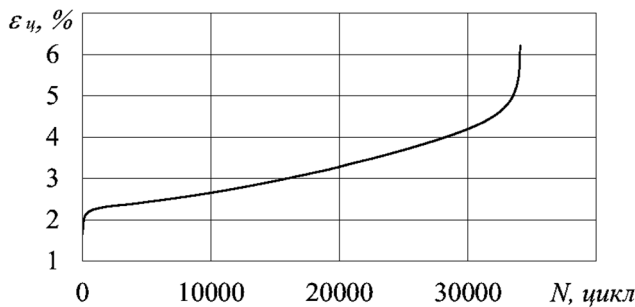


Рис. 3. Залежність деформації в циклі $\epsilon_{ц}$ від числа циклів навантаження N при одновісному пульсуючому циклічному навантаженні сталі 20 з частотою 5 Гц

виділити три ділянки – ділянок зміцнення, усталеної пошкоджуваності та знеміцнення - лавиноподібного з'єднання пошкоджень (пор) структурних елементів металу.

Вказані особливості процесу накопичення пошкодження при циклічному навантаженні добре корелюють з закономірністю накопичення пластичної деформації при циклічній повзучості [5, 6]. Враховуючи подібність протікання цих процесів, граничним станом пошкоджуваності матеріалу при циклічному навантаженні, при досягненні якого починається процес

втрати несівної здатності матеріалу, слід вважати початок втрати стійкості циклічного деформування (початок останньої стадії). Характерний вид залежності деформації в циклі $\epsilon_{ц}$ від числа циклів навантаження N наведено на рис. 3.

Потрібно відзначити, що при досягненні матеріалом стадії втрати стійкості циклічного деформування в умовах циклічної повзучості характеризується різким збільшенням приросту пластичної деформації та пов'язаним з цим різким збільшенням кількості дефектів, що в свою чергу, відображається зниженням значень коефіцієнта гомогенності m (рис.4).

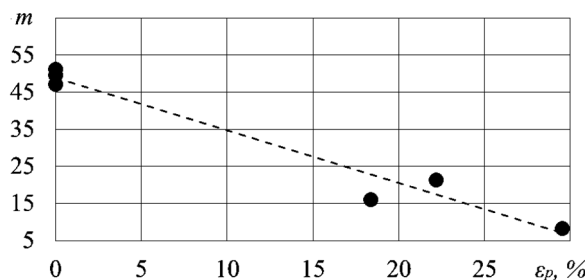


Рис. 4. Залежність коефіцієнта гомогенності m від пластичної деформації ϵ_p при циклічному навантаженні

Отримані значення твердості HB та коефіцієнти гомогенності m отримані для непошкодженого стану матеріалу та для початкового етапу втрати стійкості циклічного деформування наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Значення твердості HB30 та коефіцієнтів гомогенності m для сталі 20 при досягненні стадії втрати стійкості циклічного деформування.

$\varepsilon_p, \%$	Вихідний стан		Граничний стан	
	HB	m	HB	m
18,356	128,4	50,2119	145,1	16,11079
22,14	130,9	49,73381	120,2667	21,4807
29,513	134,4667	49,05276	129,3	8,303687

Список літератури

1. Гігіняк Ф.Ф. Аналіз кінетики накопичення пошкоджень теплостійких сталей за плоского напруженого стану при циклічному навантаженні за різних температур/ Гігіняк Ф.Ф., Булах П.О., Масло О.М. // - Проблеми міцності. – 2020. - №3. - С.46-54.
2. Музыка Н. Р. Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоцикловом нагружении. / Музыка Н. Р., Маковецкий И. В., Швец В. П. // - Проблемы прочности - 2008. - № 2. - С. 5–10.
3. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твёрдого тела. Москва : Наука, 1988. 712 с.
4. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. Киев. 2004. 133 с.
5. Гігіняк Ф. Ф., Лебедев А. О., Шкодзінський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. Київ : Наук. думка, 2003. 270 с.
6. Стрижало В. А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. Киев : Наук. думка, 1978. 238 с

Rating of the limiting state of 20K steel under low-cycle loading using the using the method of LM-hardness

Bulakh P.O., Shvets V.P., Maslo O.M.

In the express diagnostics of the condition of the material of the elements of the structures in operation and the materials for the manufacture of the responsible elements of the equipment, it is necessary to take into account the current damage. At the same time, non-destructive methods of control are more relevant, which allow to assess the level of scattered damage in the material and the degree of degradation of its structure of the metal. Another important factor in controlling the current state of the material is the assessment of the residual life of the structural element under operating loads.

This paper presents the results of research on the application of the non-destructive method of LM-hardness in assessing the characteristics of the limiting state of the material of real structural elements operating under low-cycle load.

Keywords: limit state; low-cycle load; non-destructive testing; damageability; LM-hardness method