

Оценка остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин

М. А. Стариков¹, Ю. А. Никифоров²

Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина

¹ starikovmax@rambler.ru

² nikifor1957@ukr.net

Исследована возможность применения в качестве показателей индикаторов остаточного ресурса крановых металлоконструкций трех параметров: твердость материала объекта по Бринеллю; коэффициент вариации твердости материала и коэрцитивная сила. Показано, что при экспертном обследовании металлоконструкций грузоподъемных машин с целью определения их состояния можно использовать коэффициент вариации твердости и коэрцитивную силу. Параметр твердости неприменим для решения этой проблемы.

Ключевые слова: остаточный ресурс, металлоконструкция, грузоподъемные машины, коэрцитивная сила, твердость, дисперсия твердости.

Введение. Одним из основных вопросов, возникающих в процессе эксплуатации грузоподъемной техники, является оценка ее остаточного ресурса и возможность продолжения работы после исчерпания расчетного срока службы, определенного заводом-изготовителем. Согласно действующим правилам [1], для этого необходимо проведение экспертного обследования грузоподъемной машины. Однако в настоящее время не существует достоверной методики по комплексной оценке состояния и остаточного ресурса подобных объектов. Методика оценки остаточного ресурса может базироваться на некотором показателе, который находится в пропорциональной зависимости к накопленным при эксплуатации повреждениям. В работе используется параметр поврежденности [2], определяемый по формуле $D = N/N_f$, где N – число циклов, которые отработал образец; N_f – число циклов до разрушения образца. Предполагается, что в начальный момент времени $D = 0$, а в момент поломки $D = 1$. Такими показателями могут выступать, например, скорость распространения ультразвука в объекте, ударная вязкость, коэрцитивная сила, предел прочности, условный предел текучести, размах коэффициента интенсивности напряжений и т.д. Ограничивающим фактором при использовании этих показателей металла является то, что в процессе накопления повреждений только некоторые из них изменяются в широком интервале, значительно превышающем диапазон погрешности приборов. Согласно исследованиям, проведенным в [3, 4], к характеристикам, существенно изменяющимся в процессе деградации материала, относятся коэрцитивная сила, рассеяние твердости, J -интеграл, ударная вязкость, твердость по Виккерсу. Однако степень изменения этих параметров варьируется для разных марок исследуемого металла. Например, условный предел текучести стали 12ХМФ в результате ее деградации изменяется на 3%, стали 10ГС – на 2%, а стали Ст. 3сп – на 9%.

Также известны исследования о возможности применения твердости и коэффициента вариации твердости для оценки деградации материала [5, 6].

Методика испытаний. В проведенных экспериментах исследовалась возможность использования в качестве показателей индикаторов остаточного ресурса крановых металлоконструкций трех параметров: твердость материала объекта по Бринеллю (HB); коэффициент вариации твердости материала и коэрцитивная сила.

Для эксперимента была выбрана низколегированная сталь 09Г2С, широко применяемая в промышленности, в частности в несущих ответственных металлоконструкциях грузоподъемных машин.

Оригинальность проведенного исследования состоит в следующем:

практически отсутствуют результаты исследования стали 09Г2С на предмет изменения в процессе многоциклового усталости таких показателей, как коэрцитивная сила;

не учитывались уровни напряжений в объектах при исследованиях по определению коэрцитивной силы;

большинство исследований выполнялось на образцах, которые испытывали в зоне малоциклового усталости, в то время как металлоконструкции кранов работают в области многоциклового усталости.

Цель данной работы заключается в исследовании изменения параметров твердости, коэффициента вариации твердости и коэрцитивной силы в зависимости от уровня поврежденности низколегированной стали 09Г2С в области многоциклового усталости.

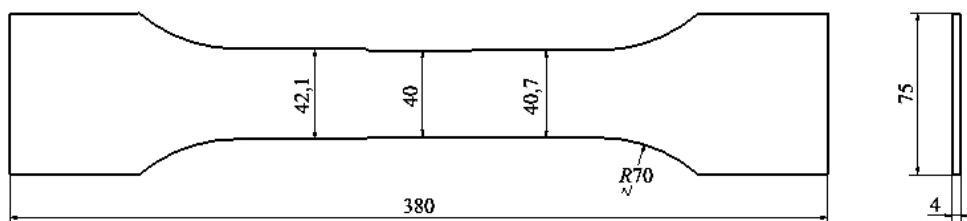


Рис. 1. Плоский образец ступенчатого типа.

Эксперимент проводился на плоских образцах ступенчатого типа, которые доводились до разрушения на универсальной испытательной машине МУП-50 (рис. 1). На образце создавались переменные во времени циклические растягивающие напряжения с постоянной амплитудой и коэффициентом асимметрии $R = 0,5$. Для каждого образца были построены кривые усталости. При их построении использовалось трехпараметрическое уравнение Вейбулла [7]

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_W} N_f = 10^{C_W}.$$

Здесь m_W , C_W – коэффициенты,

$$m_W = 0,002\sigma_R + 0,8; \quad C_W = 0,005\sigma_R + 6,6,$$

где σ_R – предел выносливости; σ – напряжения цикла; N_f – число циклов до разрушения образца.

Подставив вышеупомянутые коэффициенты в уравнение Вейбулла, получим уравнение с одним неизвестным, из которого и определяли предел выносливости. Затем по найденному пределу выносливости находили параметры уравнения Вейбулла. Результаты расчетов приведены в таблице.

Параметры уравнения Вейбулла

№ образца	m_W	C_W	σ_R , МПа	h_i , мм	σ_i , МПа	N_f , цикл	D_i
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,15	7,48	176,1	39,54	192,3	1226000	1,00
				40,40	188,2	1717000	0,71
				41,90	181,5	4408000	0,28
2	1,05	7,24	127,2	39,55	192,2	211000	1,00
				40,40	188,2	231600	0,91
				41,75	182,8	256100	0,82
3	1,13	7,41	162,6	39,74	191,3	591200	1,00
				40,45	188,0	680100	0,87
				42,00	181,0	973700	0,61
4	1,15	7,47	174,6	39,50	192,5	1082000	1,00
				40,25	188,9	1400000	0,77
				41,95	181,2	3386000	0,32
23	1,17	7,53	185,3	38,90	200,6	1374200	1,00
				39,40	193,0	3078000	0,45
				40,80	186,3	30500000	0,05
25	1,10	7,52	183,1	38,85	195,7	1703000	1,00
				39,50	192,5	2399000	0,71
				41,70	184,0	35650000	0,05
19	1,23	7,65	209,7	39,00	245,3	572500	1,00
				39,75	240,6	678700	0,84
				41,75	229,1	1199000	0,48
20	1,20	7,60	199,3	38,35	249,4	362200	1,00
				39,50	242,2	437000	0,83
				41,45	230,8	633100	0,57
14	1,18	7,55	189,4	39,30	243,4	319600	1,00
				40,25	237,6	364900	0,88
				41,75	229,1	458900	0,70
15	1,16	7,51	181,1	40,15	238,2	290700	1,00
				40,75	234,7	312900	0,93
				42,20	226,7	378100	0,77

1	2	3	4	5	6	7	8
21	1,21	7,63	206,2	39,85	240,0	598500	1,00
				40,50	236,2	692900	0,86
				42,20	226,7	1098000	0,55
22	1,18	7,55	190,7	39,30	243,4	330900	1,00
				40,25	237,6	379300	0,87
				41,75	229,1	480800	0,69
24	1,13	7,43	165,0	38,45	248,8	178600	1,00
				39,25	243,7	191700	0,93
				41,65	229,7	239300	0,75
16	1,12	7,39	158,6	37,75	168,9	1832200	1,00
				39,00	163,5	4227000	0,43
				40,70	159,0	77430000	0,02
17	1,11	7,38	155,9	38,40	166,1	1826700	1,00
				39,20	162,7	7857000	0,64
				40,35	158,0	10490000	0,17
18	1,12	7,39	151,5	39,50	161,4	5355000	1,00
				40,50	157,4	8637097	0,62
				41,50	152,2	38250000	0,16

Примечание. h_i – ширина, мм; σ_i – напряжение, МПа; D_i – поврежденность; все обозначения даны для i -й ступени образца.

В результате испытаний в разных ступенях образца была накоплена различная поврежденность. Первоначально рассмотрим изменение параметра твердости поверхностного слоя металла при накоплении в нем необратимых усталостных повреждений. Полученные экспериментальные данные измерения твердости металла (с известными величинами накопленных повреждений и уровней напряжений, которые действовали в ступени образца) аппроксимировались полиномом третьего порядка. Твердость измеряли ультразвуковым импендансным твердомером типа Константа К5У. (Единицы измерения прибора $1\text{ HB} = 10^7\text{ Па}$). Предельно допустимая погрешность прибора 10% по результатам пяти измерений.

Обработка результатов. Аппроксимацию осуществляли с использованием метода наименьших квадратов [8], получив полином следующего вида:

$$\begin{aligned}
 D = & 4,2663 \cdot 10^{-6} \sigma^3 - 2,8046 \cdot 10^{-5} \text{HB}^3 - 1,59259 \cdot 10^{-5} \sigma^2 \text{HB} - \\
 & - 4,68693 \cdot 10^{-5} \sigma \text{HB}^2 + 0,01767 \sigma \text{HB} - 0,00071087 \sigma^2 + \\
 & + 0,0203056 \text{HB}^2 - 0,908114 \sigma - 4,29141 \text{HB} - 235,007, \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$HB \geq 90; \quad 0 \leq D \leq 1, \quad 150 \text{ МПа} \leq \sigma \leq 245 \text{ МПа},$$

где D – поврежденность, накопленная в металле; σ – напряжения цикла; HB – твердость поверхностного слоя поврежденного металла.

Основываясь на критерии согласия Пирсона [8], можно утверждать, что с вероятностью 94,3% отклонение параметра поврежденности от истинного значения составляет 0,3 (параметры выборки: число степеней свободы $\nu = 39$, $\chi^2 = 26,128$). На рис. 2 представлены линии уровня поверхностей, которые получены в результате пересечения горизонтальной плоскости с поверхностью для заданного уровня (z – координата) плоскости.

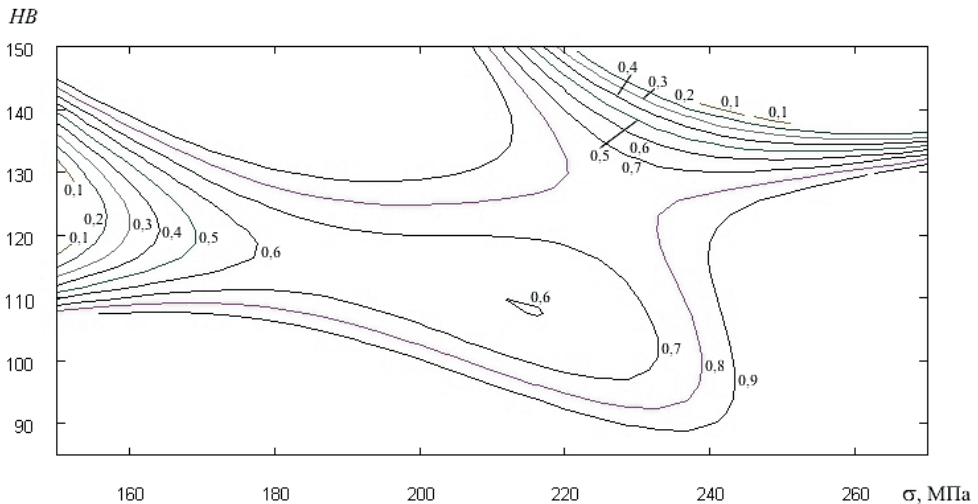


Рис. 2. Линии уровня аппроксимирующей поверхности.

Из рис. 2 следует, что одним и тем же значениям напряжений и поврежденности соответствуют несколько значений твердости поверхностного слоя, т.е. функция $D = z(\sigma, HB)$ не является монотонной. Например, поврежденности $D = 0,8$ и напряжению 200 МПа соответствуют два значения твердости (примерно 130 и 119 HB).

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что твердость при накоплении поврежденности изменяется неоднозначно. Для одних образцов твердость монотонно растет, для других – сначала уменьшается, затем увеличивается. Наибольшее изменение значения твердости в ступенях образца составляет 33,9 HB , что соответствует 67,3% его номинальной величины. Значение твердости в разрушившейся ступени каждого образца находится в диапазоне 106,2...137,6 HB .

Неоднозначность изменения поврежденности в зависимости от напряжения и твердости, а также большая относительная погрешность ее определения не позволяют использовать твердость для оценки степени ухудшения свойств металла в результате действия переменных нагрузок.

Рассмотрим изменение коэффициента вариации твердости металла при накоплении в нем повреждений (рис. 3). Значение коэффициента вариации для неповрежденного образца будет $\gamma_{HB} = 12 \text{ HB}$. Относительная погреш-

ность параметра поврежденности с вероятностью 91,1% составляет 0,2 при следующих параметрах выборки: $\nu = 48$, $\chi^2 = 35,4153$. Полином имеет вид

$$\begin{aligned}
 D = & 2,01697 \cdot 10^{-6} \sigma^3 + 0,0034189 \gamma_{HB}^3 + 4,5937 \cdot 10^{-7} \sigma^2 \gamma_{HB} - \\
 & - 0,000322643 \sigma \gamma_{HB}^2 + 0,00425589 \sigma \gamma_{HB} - 0,00122734 \sigma^2 + \\
 & + 0,067117 \gamma_{HB}^2 + 0,238269 \sigma - 1,06248 \gamma_{HB} - 13,3279, \quad (2) \\
 & \gamma_{HB} \geq 1,8, \quad 0 \leq D \leq 1, \quad 150 \text{ МПа} \leq \sigma \leq 245 \text{ МПа}.
 \end{aligned}$$

Аппроксимирующий полином отображает зависимость параметра поврежденности от σ и γ_{HB} . Очевидно, что в процессе циклического нагружения образца до разрушения γ_{HB} уменьшается примерно в два раза.

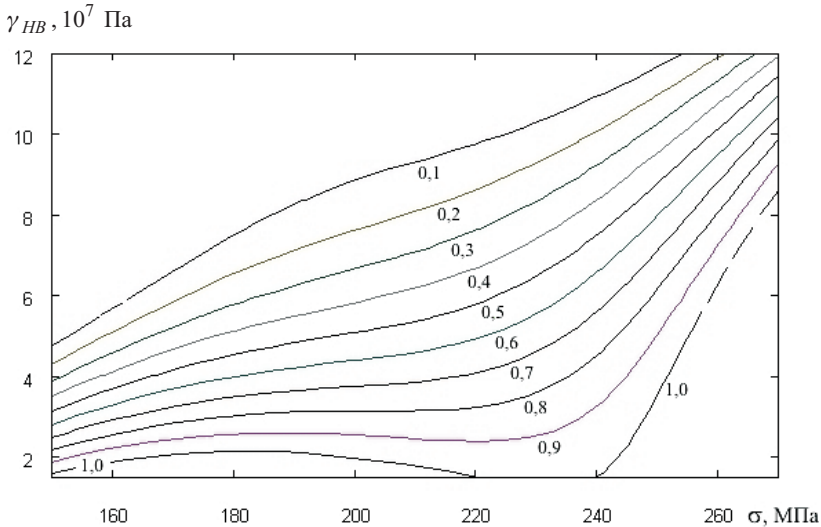


Рис. 3. Линии уровня аппроксимирующей поверхности.

Определим 90%-ный доверительный интервал для генерального среднего значения коэффициента вариации твердости на ступенях образца с поврежденностью, равной единице. По результатам эксперимента выборка имеет вид: 2,46; 2,07; 2,73; 2,10; 1,86; 2,20; 2,44; 2,27; 2,71; 2,54; 2,42; 2,39; 2,71; 2,04; 3,17. Среднее значение $\bar{\gamma}_{HB} = 2,407$, дисперсия $S_{\gamma} = 0,326$, число измерений $n = 15$. Для числа степеней свободы $k = 15 - 1 = 14$ и вероятности того, что коэффициент вариации находится за пределами искомого диапазона $\alpha = 0,1$, получаем значение квантиля статистики $t_{0,1} = 1,761$ [8]:

$$P\left(\bar{\gamma}_{HB} - 1,761 \frac{S_{\gamma}}{\sqrt{n}} < \gamma_{HB} < \bar{\gamma}_{HB} + 1,761 \frac{S_{\gamma}}{\sqrt{n}}\right) = 0,9, \quad (3)$$

$$P(2,25 < \gamma_{HB} < 2,56) = 0,9.$$

Таким образом, если величина γ_{HB} будет находиться в диапазоне 2,25...2,56, то с вероятностью 0,9% можно утверждать, что в металле накоплена поврежденность, равная единице.

Рассмотрим изменение коэрцитивной силы при накоплении повреждений в металле. Для ее измерения использовали магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М.

Результаты эксперимента были дополнены данными об изменении коэрцитивной силы в образце, доведенном до разрушения, при плавном росте внешней нагрузки (нагрузка прикладывается статически, а образец испытывает один полцикл нагружения). Для напряжений, не превышающих предела текучести исследуемого металла, коэрцитивная сила остается постоянной (3,5 А/см). Аппроксимируя экспериментальные данные зависимости степени поврежденности металла от действующих в исследуемой области напряжений (рис. 4) и коэрцитивной силы и используя известные значения последних, можно с вероятностью 93% утверждать, что относительная погрешность параметра поврежденности D составляет 0,3 (параметры выборки: число степеней свободы $\nu = 46$, $\chi^2 = 32,4694$). В данном случае полином имеет вид

$$\begin{aligned}
 D = & -9,42959 \cdot 10^{-9} \sigma^3 + 0,0226198 H_C^3 - 3,14719 \cdot 10^{-5} \sigma^2 H_C - \\
 & - 0,000109572 \sigma H_C^2 + 0,0148082 \sigma H_C - 0,000124572 \sigma^2 - 0,407519 H_C^2 - \\
 & - 0,0526874 \sigma + 1,07664 H_C + 0,258102, \quad (4) \\
 & H_C \geq 3,5; \quad 0 \leq D \leq 1, \quad 150 \text{ МПа} \leq \sigma \leq 245 \text{ МПа},
 \end{aligned}$$

где H_C – значение коэрцитивной силы.

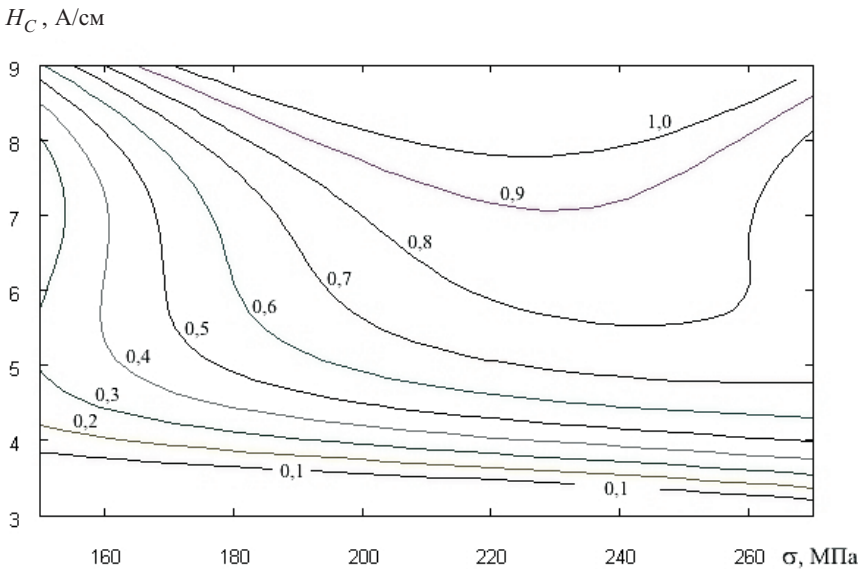


Рис. 4. Линии уровня аппроксимирующей поверхности.

Для большей части образцов коэрцитивная сила возрастала в несколько раз. Необходимо отметить, что конечные ее значения в разрушившихся ступенях значительно отличаются для каждого образца (от 4,8 до 9,0 А/см). Коэрцитивная сила монотонно повышается при увеличении напряжений и поврежденности.

Определим 90%-ный доверительный интервал для генерального среднего значения коэрцитивной силы металла с поврежденностью, равной единице. Выборка имеет вид: 7,6; 6,9; 7,0; 8,5; 8,1; 7,7; 8,3; 6,8; 4,8; 6,8; 9,0; 7,5. Среднее значение коэрцитивной силы в разрушившихся ступенях образца $\overline{H}_C = 7,5$, дисперсия коэрцитивной силы $S_{HB} = 1,058$, число измерений $n = 14$. Для числа степеней свободы $k = 14 - 1 = 13$ и вероятности того, что коэффициент вариации находится за пределами искомого диапазона $\alpha = 0,1$, находим значение квантиля статистики $t_{0,1} = 1,782$ [8]:

$$P\left(\overline{HB} - 1,782 \frac{S_{HB}}{\sqrt{n}} < H_C < \overline{HB} + 1,782 \frac{S_{HB}}{\sqrt{n}}\right) = 0,9, \quad (5)$$

$$P(7 < H_C < 8) = 0,9.$$

Таким образом, если в ступени образца коэрцитивная сила находится в диапазоне 7...8 А/см, то с вероятностью 90% можно утверждать, что в этой ступени накоплена поврежденность, равная единице. Коэрцитивная сила может быть ограниченно использована при оценке степени поврежденности металла вследствие большой относительной погрешности 0,3 (30%) между экспериментальными данными и аппроксимирующим полиномом.

Выводы

1. Если коэффициент вариации твердости для ответственных узлов металлоконструкций будет находиться в диапазоне 2,25...2,56, то можно с вероятностью 0,9% утверждать, что в этих узлах накоплена поврежденность, равная единице.

2. Если коэрцитивная сила для ответственных узлов металлоконструкций находится в диапазоне 7...8 А/см, то можно с вероятностью 90% утверждать, что в этих узлах накоплена поврежденность, равная единице.

3. Неоднозначность изменения параметра поврежденности в зависимости от напряжений и твердости, а также большая относительная погрешность его определения не позволяют использовать твердость при оценке степени накопленного усталостного повреждения в низколегированных сталях.

Резюме

Досліджено можливість використання як показників індикаторів залишкового ресурсу кранових металоконструкцій трьох параметрів: твердість матеріалу об'єкта за Брінеллем; коефіцієнт варіації твердості матеріалу і коерцитивна сила. Показано, що при експертному обстеженні металоконструкцій вантажопідійомних машин із метою визначення їх стану можна використати

коефіцієнт варіації твердості і коерцитивну силу. Параметр твердості не може використовуватися при розв'язанні цієї проблеми.

1. *НПАОП 0.00-1.01.07*. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – Киев, 2007. – 312 с.
2. *Коллинз Дж.* Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
3. *Цирюльник О. Г.* Оцінка деградації властивостей як характеристика технічного стану матеріалів конструкцій тривалої експлуатації // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – № 2. – С. 36 – 41.
4. *Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу.* – Чинний з 07.01.2005.
5. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
6. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л.* Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.
7. *Олейник Н. В., Коноплев А. В., Кобаков А. Г.* Методы ускоренного определения характеристик сопротивления усталости в практических приложениях. – Одесса: АстроПринт, 2000. – 140 с.
8. *Степнов М. Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

Поступила 30. 04. 2010