

Оценка повреждаемости зон сварного соединения малоуглеродистой стали в условиях циклического нагружения

В. П. Швец, В. А. Дегтярев, Н. Р. Музыка, А. Н. Масло

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Обсуждаются результаты экспериментального исследования накопления рассеянных повреждений в стыковых сварных соединениях стали Ст.3сп, которая широко используется при монтаже конструкций в промышленности и строительстве. Образцы сварного соединения подвергались воздействию неоднородных напряжений в условиях циклического нагружения при изгибе. Степень поврежденности металла оценивается с помощью метода ЛМ-твёрдости. Установлена линейная корреляция между коэффициентом поврежденности металла и уровнем действующих напряжений изгиба.

Ключевые слова: сварной шов, твердость, рассеяние характеристик твердости, наработка, поврежденность материала.

Введение. При эксплуатации стыковых сварных соединений металлов, как правило, рассматриваются несколько характерных зон, отличающихся химическими и физико-механическими свойствами. Это – основной металл, металл сварного шва и образующаяся в результате термического воздействия околошовная зона. В процессе эксплуатации под влиянием рабочих нагрузок в соединениях во всем объеме металла, особенно в зоне сварки, неизбежно накапливаются рассеянные повреждения (дефекты). Поскольку из-за накопления предельной плотности дефектов может произойти потеря несущей способности конструкции или ее разрушение, большую актуальность приобретают работы по диагностике текущего состояния материала конструкции неразрушающими методами, которые позволяют оценивать ее ресурс.

При проведении экспресс-контроля качества металла изделий наибольшее распространение благодаря доступности и простоте реализации получили методы, основанные на измерениях твердости [1–3]. Однако при оценке качества металла по этим методам могут возникнуть существенные ошибки. Это обусловлено тем, что твердость как физическая величина является слабочувствительной к трансформации структуры параметром [4]. Для оценки поврежденности материала в зоне сварки использовался метод ЛМ-твёрдости [5], который, как показано ранее [6–12], по сравнению с существующими методами является более репрезентативным. Согласно методу при диагностике состояния материала ориентируются на рассеяние результатов массовых измерений характеристик его твердости.

Методика проведения испытаний и их результаты. Объектом исследований служили сварные стыковые соединения малоуглеродистой стали Ст.3сп. Образцы для испытаний (рис. 1) вырезали из сварной пластины размером 400 × 660 × 14 мм со стыковым соединением вдоль длинной стороны, которое выполнено электродуговой сваркой.

Усталостные испытания образцов проводили на установке ДСО-2 [13] путем нагружения поперечной силой в плоскости наименьшей жесткости при

отнулевым цикле. В качестве критерия разрушения образца принято образование трещины на его поверхности, предельная длина которой равна 10 мм, что соответствует ее критической глубине 2,0–2,5 мм [14].

На рис. 2 представлена схема нагружения образца. Показаны области определения твердости в центральной и примыкающих зонах сварного шва.

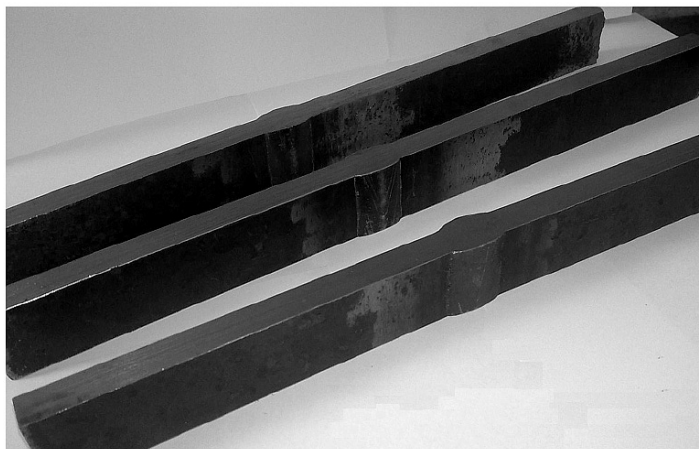


Рис. 1. Общий вид образцов сварного стыкового соединения.

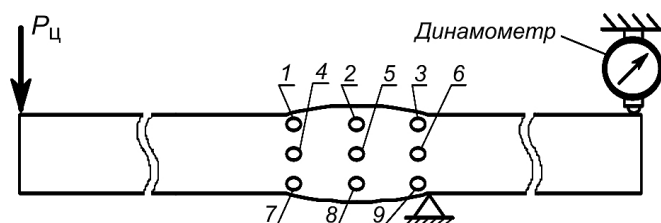


Рис. 2. Схема нагружения образца. (1–9 – области измерения твердости в сварном шве.)

Следует отметить, что при выбранной схеме нагружения в образце реализуется неоднородное напряженное состояние (рис. 3). Этому способствует наличие утолщения в зоне сварного шва. При рассмотрении околошовных зон предполагается, что закон изменения напряжения цикла и его максимальные значения не изменяются в течение всего испытания. Измерения твердости проводили таким образом, чтобы исключить попадание индентора в смежные зоны действия разных напряжений. Действие касательных напряжений в околошовных зонах и шве считалось пренебрежительно малым, и их влиянием на накопление повреждений пренебрегали.

Поврежденность металла в зоне сварки оценивали методом LM-твердости на исходных образцах и испытанных при различных уровнях максимальных напряжений цикла σ_{\max} (на рис. 3 $\sigma_{\max} = 200$ МПа), выдержавших разное число циклов нагружений до разрушения. Твердость *HRB* измеряли портативным твердомером COMPUTEST SC производства фирмы ERNST (Швейцария) в основном металле, околошовной зоне и в металле шва (рис. 2). В каждой области получали 30 значений твердости. Усредненные значения твердости в шве и околошовной зоне приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Значения твердости HRB в шве и околошовной зоне

σ_{\max} , МПа	$N \cdot 10^{-6}$, цикл	HRB в областях (рис. 2)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Исходное состояние	0	75,4	83,3	76,9	74,8	81,3	75,6	75,8	84,5	77,3
200	10,00	77,5	83,2	76,9	76,8	81,9	76,3	79,9	85,1	77,9
208	3,22	76,7	83,4	77,0	75,2	82,5	76,5	77,4	83,9	77,1
242	1,21	77,3	84,2	79,5	77,0	85,8	77,3	79,1	87,5	79,8
263	0,54	78,0	85,5	78,1	78,9	83,4	78,4	79,8	84,9	78,9
280	0,85	83,3	89,3	84,5	80,8	82,9	81,6	84,6	87,9	82,0

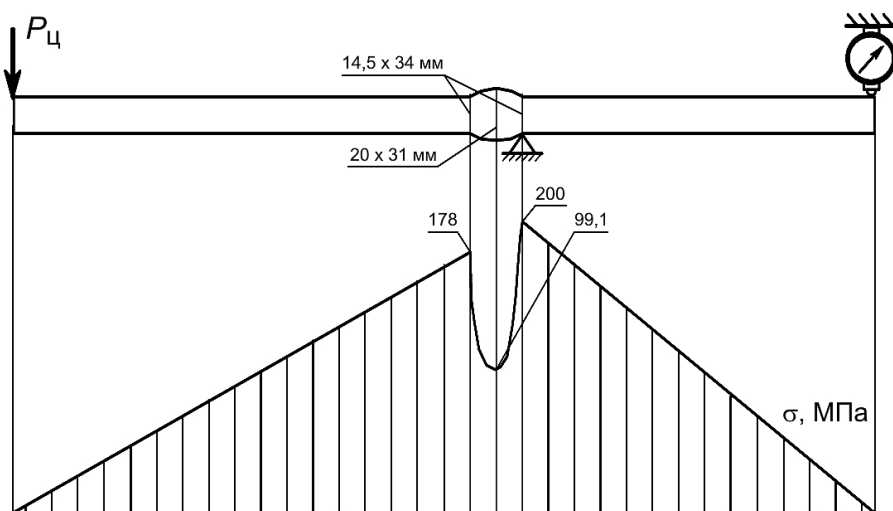


Рис. 3. Эпюра максимальных изгибающих напряжений цикла.

Повреждения металла в оценке коэффициентом гомогенности Вейбулла m (табл. 2) определяли по формуле Гумбеля [5]:

$$m = 0,4343 d_n \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

где d_n – параметр, зависящий от количества измерений n ; H_i – значение твердости при i -м измерении; $\overline{\lg H}$ – среднее значение логарифма твердости по результатам n измерений.

В течение длительного времени многие авторы предпринимали попытки описать процесс накопления повреждений в материале с помощью разных критериев [15–20]. Как правило, кинетика накопления повреждений описывается некоторым параметром, изменяющимся от начального (исходного) значения до конечного, когда конструктивный элемент уже непригоден к

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициента гомогенности m в зоне шва и околошовной зоне

σ_{\max} , МПа	$N \cdot 10^{-6}$, цикл	m в областях (рис. 2)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Исходное состояние	0	90,4	132,8	90,7	84,0	121,9	95,8	91,2	129,6	90,4
200	10,00	72,3	111,4	65,8	82,7	106,6	93,7	89,5	121,3	81,3
208	3,22	66,2	106,3	59,9	70,1	95,3	83,3	78,6	110,9	63,6
242	1,21	62,3	101,9	46,8	68,7	89,7	80,6	76,4	109,1	59,5
263	0,54	50,4	100,6	41,2	64,5	88,1	73,2	52,9	100,9	48,1
280	0,85	44,5	85,2	36,8	63,1	78,9	72,3	50,1	82,6	41,0

эксплуатации. В [21] был предложен самый простой параметр поврежденности ψ , который изменяется в пределах $1 \geq \psi \geq 0$. Для количественной оценки степени поврежденности материала по аналогии с параметром Качанова предлагается использовать коэффициент поврежденности материала K_m :

$$K_m = \frac{m_0 - m}{m_0}, \quad (2)$$

где m_0 , m – коэффициенты гомогенности Вейбулла, характеризующие исходное состояние материала и состояние материала после наработки соответственно. Значение $K_m = 0$ соответствует исходному состоянию материала ($m = m_0$), $K_m \rightarrow 1$ – после наработки материала.

При сопоставлении полученных значений K_m между собой можно оценить поврежденность сварного соединения. В качестве примера на рис. 4 приведены эпюры распределения HRB и K_m в образце, испытанном при максимальном напряжении цикла $\sigma_{\max} = 263$ МПа и наработке материала $N = 0,54 \cdot 10^6$ цикл. Заметим, что абсолютные значения твердости металла сварного шва несколько выше таковых околошовной зоны (табл. 1).

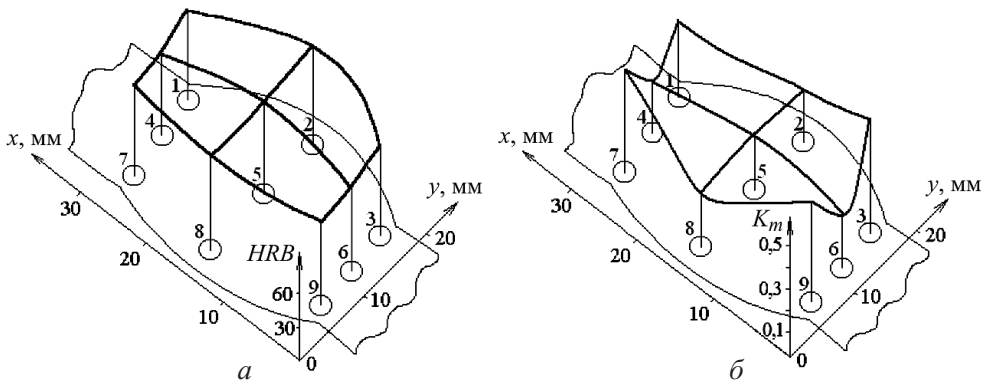


Рис. 4. Поля распределения характеристик твердости HRB (а) и коэффициента поврежденности материала K_m (б). (1–9 – области измерения твердости.)

Т а б л и ц а 3

Значения коэффициента поврежденности K_m в шве и околошовной зоне

σ_{\max} , МПа	$N \cdot 10^{-6}$, цикл	K_m в областях (рис. 2)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	10,00	0,2002	0,1611	0,2745	0,0155	0,1255	0,0219	0,0186	0,0640	0,1007
208	3,22	0,2676	0,1995	0,3396	0,1655	0,2182	0,1304	0,1381	0,1443	0,2965
242	1,21	0,3108	0,2326	0,4840	0,1821	0,2642	0,1586	0,1623	0,1558	0,3418
263	0,54	0,4425	0,2425	0,5457	0,2321	0,2772	0,2359	0,4199	0,2215	0,4679
280	0,85	0,5077	0,3584	0,5942	0,2488	0,3527	0,2453	0,4506	0,3626	0,5464

Примечание. Для исходного состояния материала $K_m = 0$.

Коэффициент поврежденности K_m металла сварного шва и околошовной зоны изменяется в зависимости от координат, что свидетельствует о разной поврежденности металла сварного соединения (табл. 3).

Наибольший уровень поврежденности отмечается в металле, примыкающем непосредственно к сварному шву в зоне растянутых волокон (на рис. 2 области 1, 3). В центральной части верхнего и нижнего усиления шва значения коэффициента K_m наиболее низкие (области 2, 8), что говорит о меньшей поврежденности металла. Разрушение образца произошло в околошовной зоне (область 3), т.е. при максимальном значении K_m .

Результаты исследований показывают, что разброс абсолютных значений твердости металла испытываемых образцов изменяется в пределах 3...7% по всему сварному шву (табл. 1), в то время как поврежденность структуры поверхностного слоя металла, оцененного коэффициентом K_m , в околошовной зоне достигает 60%, в шве – 36% по отношению к исходным значениям и существенно изменяется как в продольном, так и в поперечном направлении стыкового сварного соединения.

Следует также отметить, что с увеличением действующего напряжения показатель K_m в околошовной зоне и в других зонах сварного соединения имеет тенденцию к увеличению (табл. 3, рис. 5).

Это свидетельствует о том, что с ростом нормальных напряжений цикла накопление повреждений происходит более активно. Максимальная интенсивность накопления повреждений от действующих напряжений отмечается в околошовной зоне сварного соединения (на рис. 2 области 1, 3, 7, 9). Установленную корреляцию (рис. 5) уровней предельной поврежденности с рабочими напряжениями можно считать линейной.

Зависимость предельного коэффициента поврежденности материала K_m от действующих напряжений может служить в качестве тарировочной зависимости при выборе эксплуатационного напряжения и при оценке остаточного ресурса сварных стыковых соединений, работающих в условиях циклического нагружения и подверженных действию изгибающего момента.

Заключение. Изучено качество металла сварного стыкового соединения в исходном состоянии в оценке коэффициентом m . Установлено, что еще до наработки оценка области материала шва коэффициентом Вейбулла m разли-

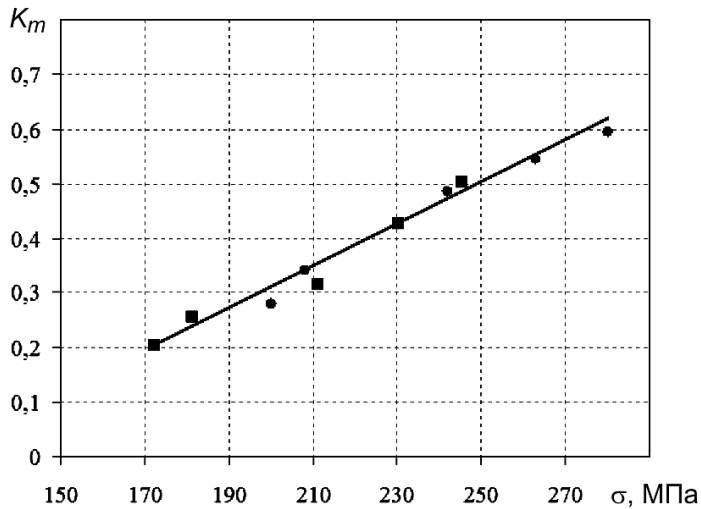


Рис. 5. Зависимость коэффициента поврежденности материала K_m от действующих нормальных напряжений цикла: ■, ● – области 1 и 3 соответственно (рис. 2).

чается, причем наименьшей однородностью обладают зоны перехода основного металла в сварной шов. Исследована поврежденность сварных стыковых соединений при наработке. Показано, что металл сварного шва по сечению повреждается неодинаково: наиболее существенно на растянутых волокнах в местах перехода сварного шва в основной металл, в центральной части шва значения параметра K_m минимальны, что свидетельствует о меньшей поврежденности металла.

Полученные данные подтверждают эффективность использования метода ЛМ-твердости для контроля качества сварных соединений по параметрам рассеяния характеристик твердости при массовых измерениях, в том числе во время эксплуатации изделия.

Резюме

Обговорюються результати експериментального дослідження накопичення розсіяних пошкоджень у зварних стикових з'єднаннях сталі Ст.3сп, що широко використовується для монтажу конструкцій в промисловості та будівництві. Зразки зварних з'єднань зазнавали дії неоднорідних напружень в умовах циклічного навантаження при згині. Степінь пошкодженості металу оцінювали за допомогою методу ЛМ-твердості. Установлено лінійну кореляцію між коефіцієнтом пошкодженості та рівнем діючих напружень згину.

1. Гогоберидзе Д. Б. Твердость и методы ее измерения. – М.; Л.: Машгиз, 1952. – 320 с.
2. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. – М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
3. Марковец М. П. Определение механических свойств материалов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.

4. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Швець В. П. О резервах повышения достоверности методов определения твердости материалов // Пробл. прочности. – 2011. – № 3. – С. 5 – 18.
5. Патент України № 52107А, МКИ 7, G 01 N 3/00, G01 N 3/40/. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “LM-метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Чинний з 15.01.03.
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. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Новый метод оценки деградации материала в процессе наработки // Залізничний транспорт України. – 2003. – № 5. – С. 30 – 33.
8. Швець В. П., Музыка М. Р., Маковецький І. В., Булах П. О. Контроль поточного стану металу стрілкового переводу в процесі напрацювання // Пробл. прочности. – 2011. – № 1. – С. 104 – 108.
9. Зайцева Л. В., Филатов В. Э., Каток О. А., Швець В. П. Оценка технического состояния металлоконструкций // Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка). – 2010. – № 5 (129). – С. 68 – 71.
10. Писаренко Г. Г., Швець В. П., Майло А. М. та ін. Дослідження процесів накопичення пошкоджень сплаву АМг6Н при багатоциклового навантаженні // Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні: Тези доп. ІV Міжнар. наук.-техн. конф. – Київ, 2011. – С. 201 – 202.
11. Лебедев А. А., Швець В. П. Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и разгруженном состояниях // Пробл. прочности. – 2008. – № 3. – С. 29 – 37.
12. Лебедев А. А., Ламашевский В. П., Музыка Н. Р. и др. Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях // Там же. – 2011. – № 5. – С. 32 – 44.
13. Дегтярев В. А. Установка типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном и гармоническом нагружении с различной асимметрией цикла // Там же. – 1982. – № 10. – С. 110 – 113.
14. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 213 с.
15. Игнатович С. Р. Структурная модель накопления микроповреждений в конструкционных материалах // Пробл. прочности. – 1988. – № 5. – С. 8 – 12.
16. Дмитриев Н. Н., Канарчук В. Е., Деркачев О. Б. Исследование циклической повреждаемости материалов по кинетике теплового поля // Дефектоскопия. – 1991. – № 3. – С. 26 – 30.
17. Коллинз Дж. Повреждение материала в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

18. *Сосновский Л. А., Махутов Н. А.* Предельное состояние силовых систем и процессы их повреждения. Сообщ. 1. Энергетический критерий разрушения // Пробл. прочности. – 1993. – № 1. – С. 11 – 23.
19. *Fonseka G. U. and Krajcinovic D.* The continuous damage theory of brittle materials. Pt. 2. Uniaxial and plane response modes // Trans. ASME, J. Appl. Mech. – 1981. – **48**, No. 4. – P. 816 – 824.
20. *Park T. and Voyiadjis G. Z.* Kinematic description of damage // Ibid. – 1998. – **65**, No. 3. – P. 93 – 98.
21. *Качанов Л. М.* Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 312 с.

Поступила 05. 06. 2012