

Исследование поврежденности конструкционных сталей методами неразрушающего контроля

Левин В.П.^{1,2,a)}, Ботвина Л.Р.¹

^{a)} Corresponding author: vlevin@imet.ac.ru

¹ *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, 199334, Россия.* ² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия. e-mail: vlevin@imet.ac.ru*

Abstract. Представлены результаты исследования стадийности развития поврежденности в трех конструкционных сталях (стали 20, 45 и 12X18H10T) на различных стадиях усталостного разрушения методами неразрушающего контроля.

Акустические, магнитные и электрические параметры исследуемых сталей измеряли во время периодических остановок испытаний. По характеру изменения физических величин выделены стадии накопления поврежденности перед разрушением образца. Предложены параметры неразрушающего контроля, характеризующие переход к последней стадии развития поврежденности перед разрушением.

Введение

Установление природы стадийности пластической деформации является одной из основных проблем в физике прочности и пластичности [1]. Существуют различные подходы к оценке стадийности пластической деформации. Общим в этих подходах является то, что стадийность пластической деформации определяется в основном развитием дислокационной структуры, которая не учитывает процессы накопления повреждений [2]. По мере увеличения пластической деформации процессы накопления поврежденности материала (зарождение пор, микротрещин) смещаются в сторону накопления дефектов до предельных значений [3]. Развитие процессов поврежденности представляет собой также многостадийный процесс, зависящий как от начального структурного состояния, так и его изменения [4]. Под действием приложенного напряжения процессы пластичности и разрушения идут практически одновременно, и взаимосвязано [5,6.] На начальной стадии деформирования пластическая деформация формирует критическую структуру, определяя

место и механизм зарождения микротрещин. На завершающей стадии развития пластической деформации развитие макротрещины является ведущим процессом пластической деформации. Стадийность в развитии пластической деформации на промежуточных стадиях определяется эволюцией микротрещин [7,8].

Для оценки накопленной пластической деформации широко применяются акустические методы [9] и магнитные методы неразрушающего контроля [10]. Магнитные методы позволяют оценить влияние пластической деформации на поврежденность и магнитные характеристики сталей [11, 12, 13].

В данной работе проведено исследование стадийности развития поврежденности в конструкционных сталях методами неразрушающего контроля.

Материал и методы исследования

Циклические испытания были проведены на плоских корсетных образцах (170×40×5 мм) с частотой $f = 30$ Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$ при одной амплитуде нагружения на испытательной машине Инстрон 8801. Для оценки поврежденности материала испытательную машину останавливали на разных стадиях нагружения, составляющих $N/N_f = 0,3, 0,5$ и $0,7$ от долговечности образца. Химический состав исследуемых сталей в исходном состоянии, стандартные механические свойства и амплитуда напряжения σ_c , при котором образцы циклически деформировали, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав и механические свойства исследуемых сталей

Марка стали	Химический состав, мас. %						Механические свойства			Амплитуда напряжения σ_c , МПа
	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	δ , %	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_b , МПа	
Сталь 20	0.17	0.21	0.36	0.04	0.07	0.05	37.0±2.5	283±4.7	435.3±4	370
Сталь 45	0.43	0.25	0.55	0.05	0.11	0.11	24.7±2.7	342±12.5	641.7±2	470
12X18H10T	0.07	0.28	0.91	9.52	0.36	18.0	69.6±3.0	211.7±4.6	593±6.1	460

Во время остановок испытательной машины были измерены акустические (скорость V и коэффициент затухания α продольных ультразвуковых волн), магнитные (коэрцитивная сила H_c , напряженность собственного магнитного поля H_p , вихретоковый параметр H_{ec}), электрические (электросопротивление R) характеристики образцов. Акустические свойства

были оценены с помощью ультразвукового дефектоскопа «Panametrics» - EPOCH-4 на частоте 10 МГц. Коэрцитивную силу H_c измеряли магнитным структуроскопом МС-10. Вихретоковой параметр H_{ec} определяли с помощью вихретокового дефектоскопа ВД-90НП после предварительной калибровки прибора в области, где дефекты отсутствуют. Напряженность собственного магнитного поля образца H_p измеряли с помощью аппаратного комплекса ИКН-10-8М. Значения электросопротивления R были получены с помощью микроомметра ТС-2.

Используя программы анализа изображений, на полированной поверхности образца оценивали относительную площадь (S^*), занятую микротрещинами (суммарную площадь микротрещин, отнесенную к площади снимка) [3].

Для сравнения результатов, полученных различными физическими методами измерений, был применен единый подход, основанный на оценке параметра поврежденности D . В частности, параметр поврежденности, рассчитанный по значениям скорости распространения ультразвуковых волн, равен: $D_V = 1 - V/V_0$, где V – значение скорости ультразвука в деформированном и исходном состоянии, соответственно. Аналогичным образом, рассчитывали параметр поврежденности по другим физическим величинам.

Исследование поврежденности

В процессе циклического нагружения на боковой поверхности исследуемых образцов формируется поврежденный слой, отличающийся большим числом поверхностных микротрещин на стадии предразрушения. В структуре нержавеющей стали появляется мартенсит, индуцированный деформацией, образование которого сопровождается как процесс зарождения, так и распространения трещины [15].

Фотографии поверхности образцов из стали 20, испытанных при напряжении 370 МПа (составляющем $1,1 \sigma_B$), на различных стадиях усталостного разрушения, представлены на рис.1. Длина микротрещин, и их количество и раскрытие возрастают с увеличением числа циклов нагружения. По отношению к исходному состоянию площадь поврежденной поверхности S^* образцов из стали 20 увеличилась в 5 раз на финальной стадии усталостного разрушения.

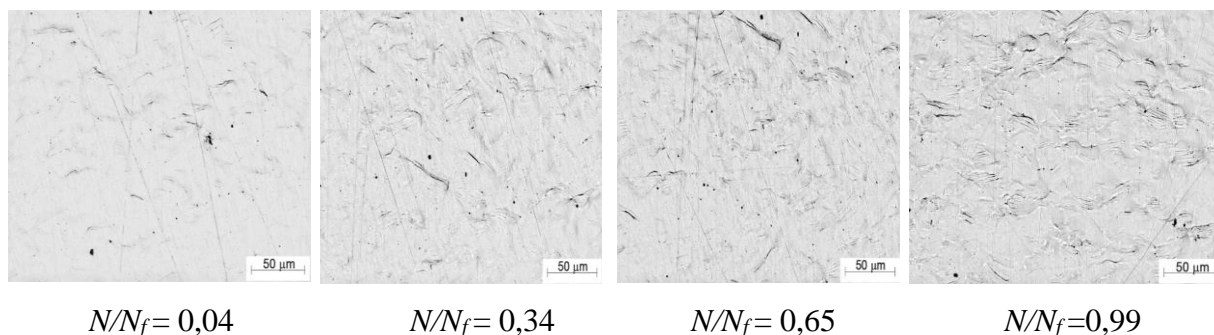


Рис.1. Фотографии поверхности образцов стали 20 на разных стадиях усталостного разрушения

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Результаты измерения физических параметров в образцах сталей после циклической деформации до различных значений относительной прочности представлены на рис. 2. В представленных зависимостях можно выделить четыре стадии I, II, III, IV) изменения физических параметров.

Первая стадия изменения физических параметров для низкоуглеродистых и нержавеющей сталей, вероятно, связана с упрочнением материала образца. Об этом свидетельствует увеличение скорости распространения V и снижение коэффициента затухания α ультразвуковых волн (рис. 2 а, б). С формированием деформационной текстуры скорость распространения ультразвука увеличивается [16]. В этом случае коэффициент затухания также может увеличиваться, как и при циклической деформации низкоуглеродистой стали. Снижение скорости распространения ультразвука V и увеличение коэффициента затухания α в среднеуглеродистой стали (рис. 2, е) и нержавеющей стали (рис. 2, б) на первом этапе может быть связано с преимущественным увеличением повреждения материала образца. На последней стадии скорость V уменьшается во всех трех сталях, а коэффициент затухания α увеличивается вследствие развития макротрещин. Между первой и последней стадией, в области $(0.2-0.8) N/N_f$, происходит квазипериодическое изменение ультразвуковых параметров, возможно, в результате иерархии микротрещин [8]. Аналогичным образом изменяются магнитные и электрические параметры.

Зависимость значений параметра поврежденности D_v , вычисленного по измерениям скорости ультразвуковых волн V и зависимость площади поврежденной поверхности

образца S^* от относительной долговечности N/N_f стали 20, показана на рис. 3. С увеличением относительной долговечности N/N_f значения параметров поврежденности D_v и S^* растут по экспоненциальному закону. Изменения параметра поврежденности D_a , вычисленного по измерениям коэффициента затухания ультразвуковых волн α , параметра поврежденности D_{Hec} , вычисленного по показаниям вихретокового прибора H_{ec} от относительной долговечности N/N_f также обнаруживают стадийность, связанную с эволюцией поврежденности (Рис.4, а, б).

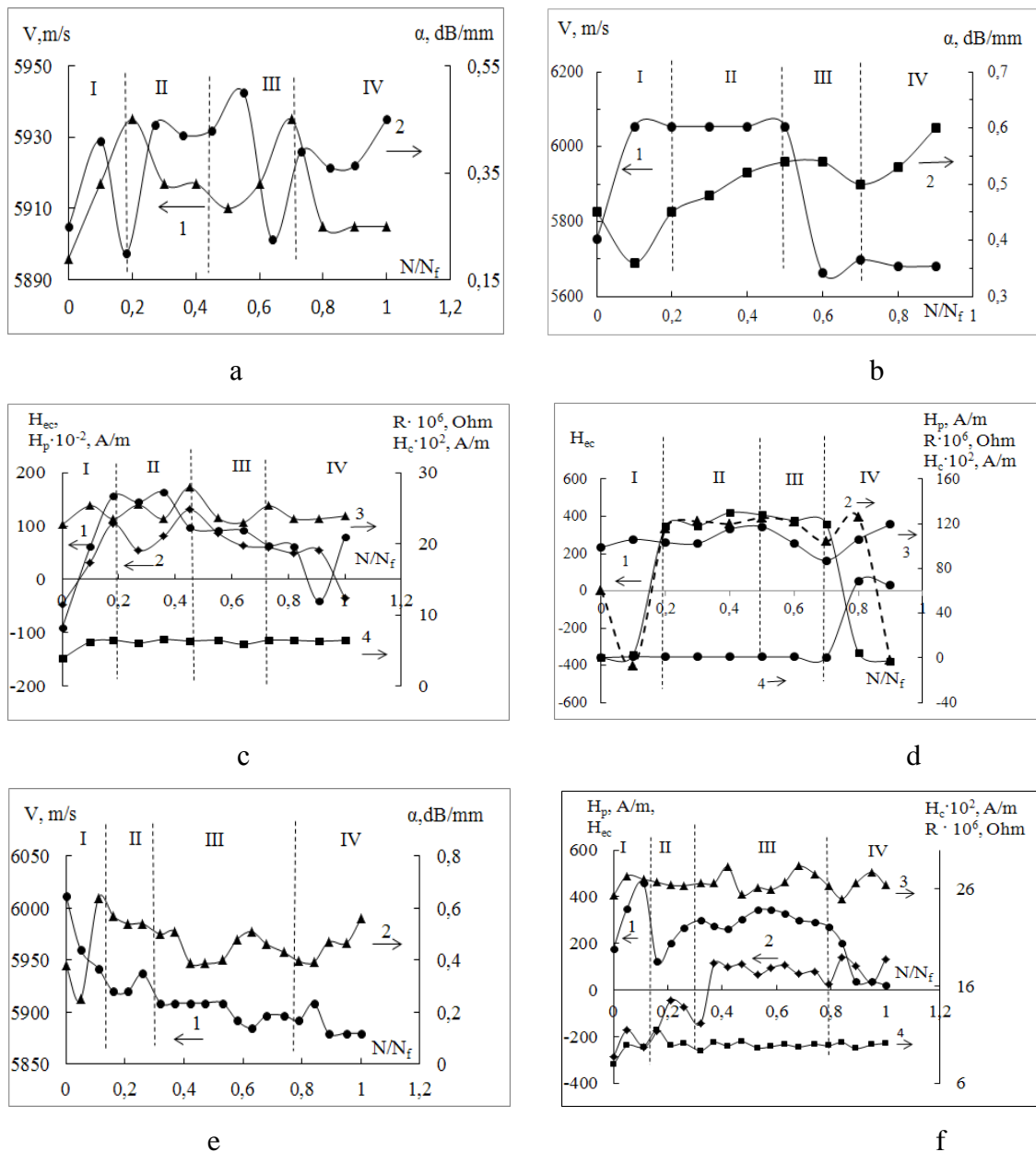


Рис. 2. Зависимость ультразвуковых, магнитных и электрических параметров в стали 20 (а, с), стали 12ХН10Т (b, d), стали 45 (e,f) от относительной долговечности N/N_f : скорость V (1) и коэффициента затухания α (2) ультразвуковых волн (a,b,e); напряженность

собственного магнитного поля H_p (1), вихретоковый параметр H_{ec} (2), электросопротивление R (3), коэрцитивная сила H_c (4) (b,d,f)

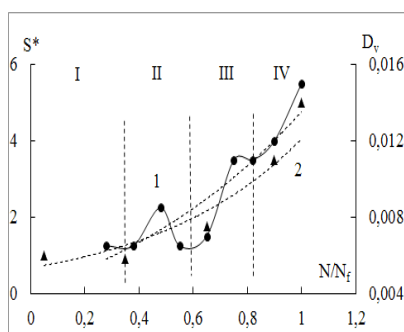


Рис.3

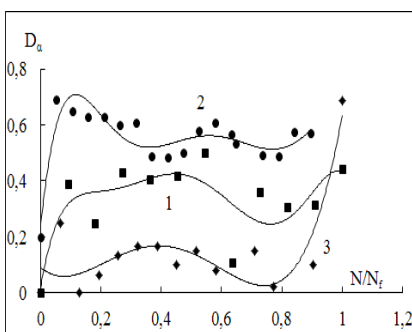


Рис.4 (а)

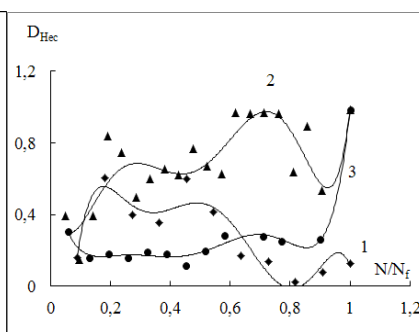


Рис.4 (б)

Рис. 3. Зависимость параметра поврежденности D_v (1) и площади поврежденной поверхности S^* (2) от относительной долговечности N/N_f в образцах из стали 20.

Рис.4. Зависимости параметров поврежденности D_α (а) и D_{Hec} (б) от относительной долговечности N/N_f в образцах из сталей 20 (1), 45 (2), 12ХН10Т (3)

Обсуждение результатов

Из представленных результатов следует, что общей закономерностью стадийного изменения физических параметров является их увеличение на первой стадии, обусловленное упрочнением материала, значительный разброс этих величин на стадиях II и III и существенное снижение физических параметров при переходе от стадии III к стадии IV. Наиболее показательным является существенное уменьшение на стадии предразрушения (стадия III) скорости распространения ультразвуковых волн V , вихретокового параметра H_{ec} и напряженности собственного магнитного поля H_p . Снижение физических параметров на предпоследней стадии может служить диагностическим признаком разрушения. Обнаруженное увеличение на стадии I акустических, магнитных и электрических параметров коррелирует с результатами, полученными авторами [11,12]. Существенное возрастание коэрцитивной силы H_c в стали 12ХН10Т (рис.2d) при переходе от стадии III к стадии IV происходит вследствие выделения мартенситной фазы [19].

Диагностическими признаками перехода от одной стадии к другой могут служить параметры k_v , k_{H_p} , $k_{H_{ec}}$, оцененные по отношениям изменений физических характеристик к изменениям относительной долговечности $k_v = \Delta V / \Delta(N/N_f)$, $k_{H_p} = \Delta H_p / \Delta(N/N_f)$, $k_{H_{ec}} = \Delta H_{ec} / \Delta(N/N_f)$. Эти параметры при переходе от стадии III к стадии IV имеют наибольшее

значение. Было обнаружено, что указанные параметры связаны с коэффициентом деформационного упрочнения m исследованных материалов (Рис.5).

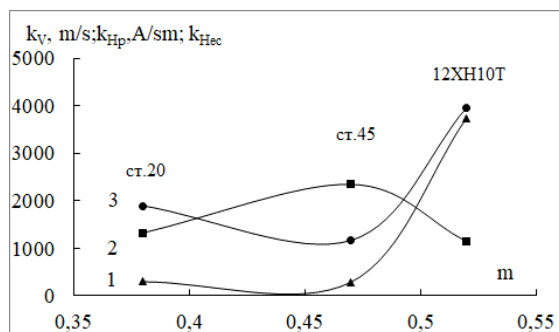


Рис. 5. Зависимость коэффициентов k_v (1), k_{Hp} (2), k_{Hec} (3) от коэффициента деформационного упрочнения m .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00674).

Литература

1. Н.А. Конева, Э.В. Козлов. Физическая природа стадийности пластической деформации. Известие вузов. Физика. 1990. №2. с.89 -106.
2. Э.В.Козлов, Л.И. Тришина, Н.А. Попова, Н.А. Конева. Место дислокационной физики в многоуровневом подходе к пластической деформации. Физическая мезомеханика. 2011. Т.14, №3, с. 95-110.
3. Л.Р. Ботвина, Н.А. Жаркова, М.Р. Тютин и др. Кинетика накопления повреждений в низкоуглеродистой стали при растяжении //Деформация и разрушение материалов. 2005. №3. с.2 - 8.
4. Л.Р. Ботвина. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М. Наука, 2008. 334 с.
5. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М. Металлургия. 1986. 224 с.

6. В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова, О.Б. Наймарк, О.А. Плехов. Статистическое описание кинетики накопления микротрещин в металлах при ползучести. // Физическая мезомеханика. 2015. Т.18. №1. с.52 - 61.
7. С.М. Suh, R. Yuuki, H. Kitagawa. Fatigue microcracks in a low carbon steel // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 1985. Vol.8. No. 2. pp. 193 - 203.
8. Л.Р. Ботвина, А.И. Болотников, И.О. Синев. Иерархия микротрещин при циклическом и статическом нагружении // Физическая мезомеханика. 2019. Т.22. №6. с.24-36.
9. Методы акустического контроля материалов. Под ред. Алешина Н.П. М. Машиностроение. 1989. 456с.
10. М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М. Наука. 1993. 252 с.
11. Э.С. Горкунов, С.В. Смирнов, С.С. Родионова. Влияние пластической деформации при гидростатическом давлении на поврежденность и магнитные характеристики низкоуглеродистой стали 3 сп // Физическая мезомеханика. 2003. Т.6, №5. с. 101-108.
12. Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, А.И. Макаров, Л.Х. Коган, С.А. Роговая. Применение вихретокового метода для оценки накопленной пластической деформации и остаточных механических свойств после циклического нагружения отожжённой среднеуглеродистой стали // Дефектоскопия. 2007. №4. 24-30.
13. А.В. Макаров, Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, Л.Х. Коган, С.А. Юровских, Ю. М. Колобылин, Ю.И. Малыгина, Н.А. Давыдова. Влияние комбинированной деформационно-термической обработки на особенности электромагнитного контроля усталостной деградации, закаленной конструкционной, стали // Дефектоскопия. 2013. №12. с.22 - 40.
14. J. H. Liu, G.L. Li, X.Y. Hao, D.B. Zeng, Zh. H. Sun. Ultrasonic measurement of fatigue damage of nodular cast iron // Materials Letters. 2001. Vol. 50. pp.194 -198.
15. Л.Р. Ботвина, М.Р. Тютин, Т.Б. Петерсен, Д.В. Просвирнин, А.М. Морозов, Е.И. Колоколов. Остаточная прочность циклически деформированной нержавеющей стали // Деформация и разрушение материалов. 2019. №11. с.37- 49.
16. А.В. Гончар, А.Л. Руденко, В.В. Мишакин. Исследование микропластической деформации конструкционной стали на начальном этапе усталостного нагружения методами неразрушающего контроля // Деформация и разрушение материалов. 2012. №7. с.37 - 42.