

УДК 620.179.17

Исследование развития усталостных трещин при помощи метода диагностики акустической эмиссии

Пахомова Светлана Альбертовна^{1(*)}pahomo@bmstu.ru
SPIN-код: 7042-6638Манаев Олег Иванович²manaev_o17@mail.ru
SPIN-код: 2995-7242Головачев Евгений Александрович¹ferum-2011@yandex.ru
SPIN-код: 1944-4700¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² ВА РВСН им. Петра Великого, Балашиха, Россия

Аннотация. Исследовано развитие трещин в пружинной стали методами разрушающего и неразрушающего контроля, в том числе методом диагностики акустической эмиссии. Рассмотрена сталь 65C2BA, обладающая разной структурой и фазовым составом в зависимости от технологии термической обработки. Испытания на ударную вязкость проведены на образцах двух типов: с круглым надрезом, острым надрезом и трещиной. Проведено сравнение термического упрочнения стали следующими двумя способами: а) закалка с отпуском и б) изотермическая закалка.

Ключевые слова: трещиностойкость, пружины, акустическая эмиссия, термическая обработка, изотермическая закалка

Investigation of the development of fatigue cracks using the acoustic emission diagnostic method

Pakhomova Svetlana Albertovna^{1(*)}pahomo@bmstu.ru
SPIN-code: 7042-6638Manaev Oleg Ivanovich²dr.mgtu@yandex.ru
SPIN-code: 2995-7242Golovachev Evgeniy Alexandrovich¹ferum-2011@yandex.ru
SPIN-code: 1944-4700¹ BMSTU, Moscow, Russia² VA RVSН, Balashikha, Russia

Abstract. Resistance to the emergence and development of cracks in spring steel by methods of destructive and non-destructive testing, including the method of diagnostics of acoustic emission, was investigated. Steel C0.65Si2W with different structure and phase composition depending on heat treatment technology is considered. Impact tests were carried out on two types of samples: 1) with a round notch and 2) with a sharp notch with a crack. Thermal hardening of steel was compared by the following methods: a) quenching with tempering and b) isothermally quenching.

Keywords: energy supply, environmental pollution, nanotechnology, ecological balance, specific properties of nanomaterials

Введение. В настоящее время в машиностроении кроме стандартных испытаний на растяжение для определения механических свойств сталей получили применение методы неразрушающего контроля. Один из таких методов — индентирование, основанное на вдавливании индентора в поверхность образца и позволяющее проводить экспресс-диагностику деталей без вывода их из эксплуатации [1, 2]. Этот метод позволяет проводить контроль таких важных физико-механических характеристик, как твердость, вязкость разрушения и предел текучести. Однако метод не позволяет исследовать склонность сталей к трещинообразованию на поверхности образца. Для изучения процессов зарождения трещин возможно применение другого метода неразрушающего контроля — метода, основанного на регистрации параметров акустической эмиссии [3, 4]. Последний, благодаря высокой чувствительности, позволяет фиксировать сигналы, вызванные изменениями строения стали в процессе деформации [5, 6].

Целью работы является исследование трещиностойкости пружинной стали 60C2BA путем применения методов разрушающего и неразрушающего контроля.

Материалы и методы. Объекты исследования выполнены из стали 65C2BA, содержание элементов которой приведено в табл. 1. Толщина образцов была равна толщине ленты и составляла 3,0 мм, ширина — 26 мм, а длина — 350 мм. Стандартные механические свойства, определенные при разрыве образца в состоянии поставки, соответствовали требованиям.

Таблица 1

Содержание элементов в стали 65C2BA, масс. %

C	Mn	Si	W	Cr	Cu	Ni	P	S
				не более				
0,61– 0,69	0,70– 1,00	1,50– 2,00	0,80– 1,20	0,30	0,20	0,25	0,025	0,025

Нагрев для закалки производился в камере электропечи по стандартному режиму ($T = A_3 + 30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с охлаждением в масле). Отпуск проводили при температуре $T = 400\text{--}475\text{ }^{\circ}\text{C}$ в камере электропечи (с охлаждением в масле). Нагревание для изотермической закалки проводили в солевой ванне с последующим переходом в щелочную ванну для изотермической выдержки при температуре $T = 300\text{--}375\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время выдержки составляло 20–25 мин.

Фрактографические и металлографические исследования разрушившихся образцов выполнены на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-6490LV и на оптическом микроскопе Olympus GX51F при увеличениях $\times(50\text{--}3000)$. Микроструктуру образцов выявляли травлением в 5 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Структура стали в исходном состоянии представляет собой смесь феррита и перлита. Структура стали после закалки с отпуском состоит из троостита от-

пуска, а после изотермической закалки — из мелкодисперсного бейнита и остаточного аустенита, содержание которого составляло около 11–15 % [6–8].

Результаты экспериментов и обсуждение. Свойства стали после испытаний на разрыв стандартных образцов и характеристик, определяемых на образцах с трещиной приведены в табл. 2. Результаты получены при условии равного предела прочности $\sigma_b = 1500$ МПа после термической обработки двумя исследуемыми способами.

Таблица 2

Свойства стали 65С2ВА после термической обработки двумя способами

Свойства	Закалка + отпуск при t , °С				Изотермическая закалка при t , °С		
	400	425	450	475	300	325	350
KCU [кДж/м ²]	0,4	0,45	0,5	0,6	0,6	0,9	0,75
KCT [кДж/м ²]	0,05	0,08	0,1	0,15	0,2	0,15	0,3
KC ₃ [кДж/м ²]	0,35	0,37	0,4	0,45	0,4	0,75	0,45
K _i [МПа·м ^{-1/2}]	33	58	75	90	50	60	70
K _c [МПа·м ^{-1/2}]	35	95	155	200	95	125	140

На начальном этапе нагружения отмечается равномерный процесс регистрации акустических сигналов, возникающий на стадиях роста нагрузки. Такой характер накопления импульсов АЭ свидетельствует о равномерном развитии микродефектов. Дальнейшее нагружение объекта приводит к снижению общего количества зарегистрированных событий и возникновению неравномерно распределенных деформаций. Неравномерность накопления повреждений была подтверждена результатами построения локационной картины.

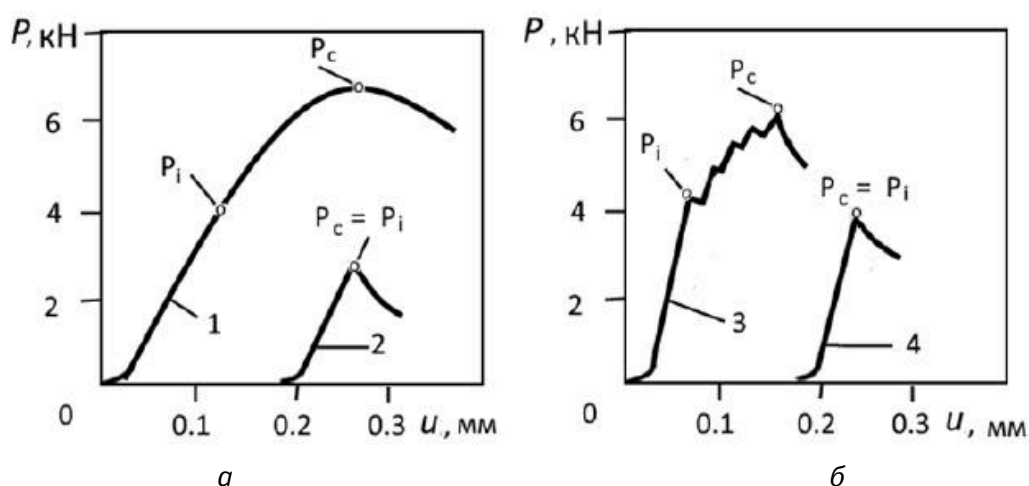


Рис. 1. Диаграммы разрушения при испытании образцов с трещиной:

а — после закалки с отпуском; *б* — после изотермической закалки;

1, 3 — $\sigma_b = 1400$ МПа; 2, 4 — $\sigma_b = 2000$ МПа

Диаграмма испытания стали после изотермической закалки в нелинейной части имеет зубчатый и пилообразный характер (рис. 1). Это указывает на скачкообразный и прерывистый рост трещины. Очередной скачок (быстрое подрас-

тание трещины, которое сопровождается частичным падением нагрузки) чередуется с кратковременным возрастанием нагрузки, что образует «зуб» на диаграмме. Каждый скачок сопровождается характерным акустическим эффектом — щелчком и приводит к появлению высокоамплитудных сигналов до 120 импульсов в секунду. В зависимости от уровня прочности образца, до разрушения происходит 1–8 скачков.

Резкое увеличение акустических параметров сигналов свидетельствует об ускоренном развитии трещин. Монотонный рост трещины идет на участке $0-P_i$, а ускоренный — на участке P_i-P_c (рис. 1). Очевидно, что первый участок характеризуется малой активностью сигналов (менее 70 дБ), а второй — более высоким уровнем характеристик АЭ.

На рис. 2 представлена сравнительная картограмма характеристик, определенных при испытании образцов с круглым надрезом и с трещиной. Результаты показывают, что стали, термически обработанные различными способами, имеют разные уровни сопротивления разрушению. Так, δ_5 и КСУ после изотермической закалки на 15–20 % выше, чем после закалки и отпуска образцов с одинаковым уровнем прочности.

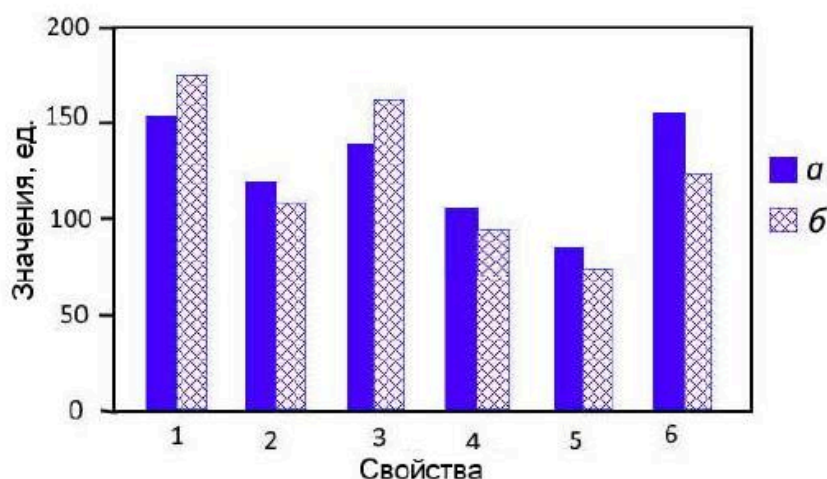


Рис. 2. Сравнительная диаграмма свойств, определяемых при испытании образцов из стали 65С2ВА на равный предел прочности $\sigma_B = 1800$ МПа:

1 — $\sigma_{0,2}$ [МПа $\times 10^{-1}$]; 2 — δ_5 [% $\times 10$]; 3 — КСУ [кДж/м² $\times 10^2$]; 4 — КСТ [кДж/м² $\times 10^3$];
 5 — K_I [МПа $\cdot$ м^{-1/2}]; 6 — K_c [МПа $\cdot$ м^{-1/2}]; а — закалка + отпуск 450 °С;
 б — изотермическая закалка при 325 °С

Полученные результаты позволяют предположить, что в вершине трещины, в условиях стесненной деформации, инициируется мартенситное превращение остаточного аустенита [7–9]. Поэтому наблюдается скачкообразное продвижение трещины, что сопровождается характерным акустическим сигналом — «щелчком». Трещина тормозится в более вязких компонентах структуры и цикл повторяется [10–12].

Заключение. Метод регистрации акустической эмиссии (благодаря высокой чувствительности) позволяет фиксировать сигналы, вызванные изме-

нениями строения стали в процессе деформации. Трещиностойкость сталей зависит от технологии термической обработки, определяющей их фазовый состав и условий роста трещины. После изотермической закалки трещиностойкость стали 65С2ВА больше, чем после закалки с отпуском, если испытания проведены на ударных образцах с круглым надрезом.

Список источников

- [1] Качанов В.К., Соколов И.В., Матюнин В.М., Барат В.А., Бардаков В.В., Марченков А.Ю. Оценка трещиностойкости упрочняющих покрытий из нитрида титана по параметрам кинетического индентирования и акустической эмиссии. *Измерительная техника*, 2017, № 7, с. 41–44.
- [2] Быков Ю.А., Унчикова М.В., Пахомова С.А. и др. Методика выбора материала и технологии термической обработки деталей машиностроения. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2015, № 8, с. 43–47.
- [3] Иванов В.И., Власов И.Э. *Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль. Справочник. Т. 7. Кн. 1.* Москва, Машиностроение, 2005, 340 с.
- [4] Иванов В.И., Барат В.А. *Акустико-эмиссионная диагностика. Справочник.* Москва, Издательский дом «Спектр», 2017, 368 с.
- [5] Комкин А.И., Никифоров Н.А. Современные методы измерения акустических характеристик однородных звукопоглощающих материалов. *Безопасность жизнедеятельности*, 2006, № 8, с. 22–27.
- [6] Fedorova L., Fedorov S., Sadovnikov A., Ivanova Y. and Voronina M. Abrasive wear of hilong botn hardfacings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 307, art. no. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/307/1/012038>
- [7] Никитина Е.Н., Глезер А.М., Иванов Ю.Ф., Аксенова К.В., Громов В.Е., Казимиров С.А. Эволюция структуры и фазового состава бейнитной конструкционной стали при пластической деформации. *Деформация и разрушение материалов*, 2016, № 12, с. 34–36.
- [8] Fedorova L.V., Fedorov S.K., Ivanova Y.S. and Voronina M.V. Increase of wear resistance of the drill pipe thread connection by electromechanical surface hardening. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 18, pp 7485–7489. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.5.539>
- [9] Махутов Н.А., Гаденин М.М. Унификация методов расчетов и испытаний на прочность, ресурс и трещиностойкость. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2019, т. 85, № 10, с. 47–54. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-10-47-54>
- [10] Pakhomova S.A., Fakhurtdinov R.S., Tsinkolenko O.A., Zolotov B.S. The influence of carburization technology on performance properties of high-loaded gear wheels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference of Young Scientists and Students Topical Problems of Mechanical Engineering*, 2019, vol. 747, art. no. 012126. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/747/1/012126>
- [11] Pakhomova S.A., Manayev O.I. Effect of Heat Shotblast Treatment Exerted on the Contact Fatigue of Carburised Heat-Resistant Steel C0.12Cr2NiWV. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, no. 4. pp. 732–735. <https://doi.org/10.1134/s2075113318040251>
- [12] Чернов Д.В., Матюнин В.М., Барат В.А., Марченков А.Ю., Елизаров С.В. Исследование закономерностей акустической эмиссии при развитии усталостных трещин в низкоуглеродистых сталях. *Дефектоскопия*, 2018, № 9, с. 21–31. <https://doi.org/10.1134/S0130308218090038>