

УДК 621

ДИАГНОСТИКА УСТАЛОСТИ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ X70 С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Галкин А.А., аспирант

Мордовина Ю.С., аспирант, ассистент кафедры «Машиностроительные
технологические комплексы»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ)

Г. Нижний Новгород

Аннотация: Целью данного исследования было определение изменения безразмерного акустического параметра D , получаемого в результате акустического неразрушающего контроля, и остаточной намагниченности B_r , коэрцитивной силы H_c , отношения H_c/B_r , фиксируемых при магнитном контроле, в зависимости от наработки испытуемых образцов из стали класса прочности X70.

Ключевые слова: магнитный контроль, акустический контроль, неразрушающий контроль, акустический параметр, S690QL

Для производства землеройной техники, грузоподъемных машин и кранов широко применяется высокопрочная сталь с пределом текучести 690 МПа (класс прочности – X70) [1]. К высокопрочным сталям (в зарубежной литературе – *HSS – High Strength Steel*) относят марки с пределом прочности от 490 МПа [4-5]. При выборе стали для конструкции важным вопросом является ее сопротивление циклическим нагрузкам. Традиционно различают малоцикловую и многоцикловую усталость [6]. В работе рассматривается малоцикловая усталость (МЦУ) с максимальной долговечностью до разрушения примерно $N_k = 5 \cdot 10^4$ циклов [10]. Практический интерес представляет также диагностика развивающегося разрушения и предупреждение аварийных ситуаций. Для этого должны использоваться методы неразрушающего контроля: например, акустический и магнитный.

Целью работы было фиксирование изменения акустического параметра D , остаточной намагниченности B_r , коэрцитивной силы H_c и их отношение H_c/B_r для отечественного аналога стали S690QL.

Объектом исследования являлась сварные образцы из стали российского производства, которая разрабатывалась как аналог европейской S690QL. Марочный и фактический химический состав стали, согласно СТО, представлен в таблице 1. Для марочного состава указано максимальное содержание элементов. Фактический химический состав исследуемой стали

определялся с помощью оптико-эмиссионной спектрометрии на спектрометре ARL 3460. Фактический химический состав соответствует марочному.

Таблица 1 – Химический состав исследуемой стали

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	V	Al
Марочный	0,20	0,86	1,8	0,018	0,01	1,0	0,50	1,1	0,30	0,07	0,14	0,05
Фактический, %	0,160	0,340	1,250	0,010	0,0006	0,280	0,220	0,030	0,050	0,020	0,003	0,040

Испытание на усталость проводилось на специализированном стенде. Нагружение во время испытания проводилось по схеме консольного изгиба с частотой упругопластического циклического нагружения 25 Гц. Амплитуда нагружения (σ_{\max}) рассчитывалась исходя из схемы нагружения, размеров образца и механических характеристик материала.

Для акустических измерений применяли акустический комплекс АИС НРК-3. Информативным параметром был акустический параметр (1):

$$D = \frac{c_1 + c_2}{c_3}, \quad (1)$$

где c_1 , c_2 - скорости распространения сдвиговых упругих волн с поляризацией (направлением колебания отдельных частиц) вдоль оси образца и поперек оси соответственно;

c_3 – скорость распространения (задержка) продольной упругой волны [21].

Магнитные характеристики фиксировались магнитным анализатором – коэрцитиметром МА-412ММ. Оценивались: остаточная намагниченность B_r , коэрцитивная сила H_c , отношение H_c/B_r .

Параметры ультразвука были определены при испытании на усталость с амплитудами напряжений 300, 350 и 450 МПа. Исследование изменения параметра D проводили до момента появления магистральной трещины. Полученные зависимости акустического параметра D от наработки образца N/N^* (отношение количества циклов, соответствующего данной точке, к количеству циклов, зарегистрированных при разрушении) показаны на рис.1. Для определения изменений поведения магнитных характеристик стали в зависимости от наработки была выбрана одна амплитуда – 350 МПа. Соответствующие зависимости показаны на рис.2.

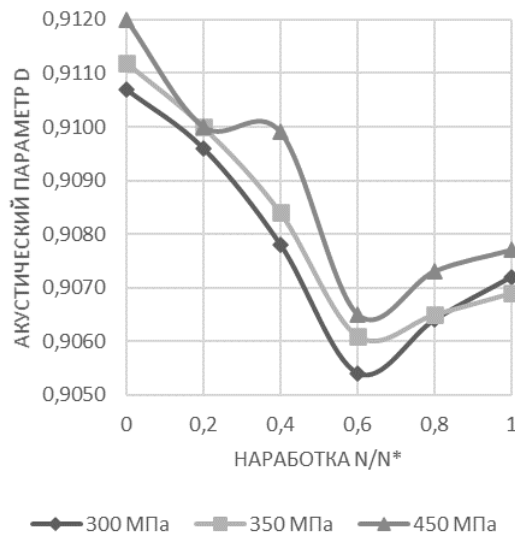


Рис. 1. Зависимость D от наработки (N/N^*) для стали X70

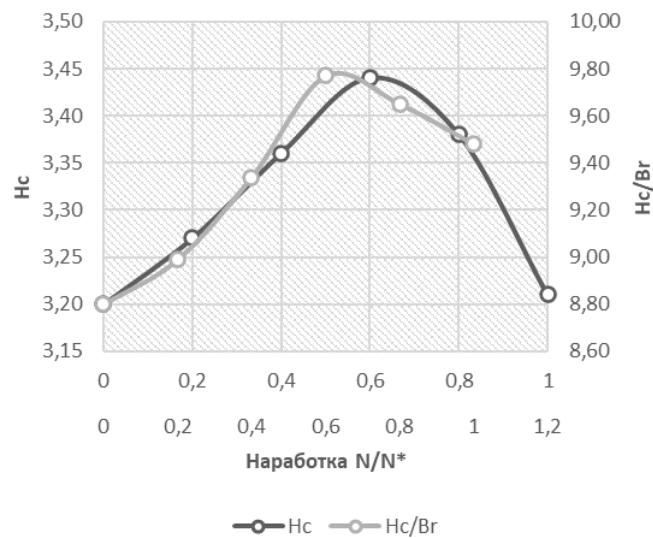


Рис.2. Зависимость магнитных характеристик от наработки (N/N^*)

Анализ изменения акустического параметра (рис.1) показывает, что при наработке стали *S690QL* (Россия) до 0,6, наблюдается монотонное снижение параметра D (кроме кривой для амплитуды 450 МПа) с последующим незначительным увеличением перед образованием магистральной трещины.

На рис.2. показаны зависимости изменения магнитных характеристик в процессе усталостного нагружения. В целом зависимости коэрцитивной силы H_c и ее отношения к остаточной намагниченности (H_c/B_r) коррелируют между собой и с изменением акустического параметра. Данная зависимость практически не изменяется при изменении амплитуды напряжений. Так, при наработке стали до 0,6 наблюдается монотонное увеличение магнитных характеристик с последующим уменьшением до исходных значений на стадии перед образованием магистральной трещины.

Такой же характер изменения акустического и магнитных параметров со схожими значениями был получен для стали 09Г2С [4], что объясняется химическим составом сталей (обе стали низкоуглеродистые

малолегированные) и структурным классом (ферритно-перлитные при охлаждении на воздухе).

Таким образом, основной этап разрушения для стали класса прочности Х70 наступает при выработке ресурса на 60 %.

Список литературы

1. Nikolić R., Arsic D., et al. Application of the S690QL Class Steel in Responsible Welded Structures. *Materials Engineering-Materialove Inzinierstvo*, 2013. - №20. – P.174-183.

2. Murakami Y., Nomoto T., Ueda T. Factors influencing the mechanism of superlong fatigue failure in steels. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Sci.*, 1999, V. 22, № 7, P. 581-590.

3. Ерасов В.С. Испытания на усталость металлических материалов (обзор) часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний / В.С. Ерасов, Е.И. Орешко // *Авиационные материалы и технологии*. 2020, № 4 (61), 59-70.

4. Аносов М.С. Неразрушающий контроль накопления усталостных повреждений в стали св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой / М.С. Аносов, Д.А. Рябов, М.А. Чернигин, А.А. Соловьев // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2023. – Т. 21, № 2. С. 47-53.