

## КОНТРОЛЬ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРНОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ E 6013 С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА—ХУАНГА

© 2021 г. Аиша Халид<sup>1</sup>, М. Газанфар Али<sup>1,2,\*</sup>, Тарик Майрадж Расул Хан<sup>1,\*\*</sup>, Мухаммад Имран<sup>1</sup>, Салман Низар<sup>1</sup>, Акил Шах<sup>1</sup>, Абид Шах<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет науки и технологий, Карачи, Пакистан

<sup>2</sup>Комплекс лабораторий Пакистанского совета научных и промышленных исследований, Карачи, Пакистан

E-mail: \*ghazanfar.ali@pnec.nust.edu.pk; \*\*khan.tariq.msu@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2020; после доработки 13.01.2021

Принята к публикации 22.01.2021

Все сварные детали при эксплуатации при повышенных температурах подвергаются старению. Воздействие на конструкцию повышенных температур отрицательно сказывается на характеристиках материала и ухудшает ударную вязкость всей конструкции. Сварная деталь также имеет предрасположенность к хрупкому разрушению. Чтобы определить вязкость разрушения, не всегда можно вывести образец из эксплуатации. Поэтому желательно разработать неразрушающий контроль *in situ* (НК), основанный на методе ультразвукового контроля (УЗК) наряду с перспективными методами обработки сигналов. Ультразвуковой контроль (УЗК) — широко используемый метод неразрушающего контроля, который хорошо показывает себя при контроле дефектов. Цель исследования — выявить количественную связь между сигналами УЗК и механическими свойствами термообработанных образцов сварных соединений. Данные были получены при контроле образцов сварных швов при различных значениях температуры с помощью УЗК. Наблюдается тенденция между изменением характеристик УЗ-сигнала, т.е. затуханием и изменением механических свойств. Распределение УЗ-сигналов с точки зрения различных уровней термического старения также было исследовано с использованием преобразования Гильберта—Хуанга (ПГХ) на полученных УЗ-сигналах. Экспериментальные зависимости позволяют прогнозировать ударную вязкость сварного образца исключительно посредством УЗК *in situ*, пока образец будет оставаться в эксплуатации.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, преобразование Гильберта—Хуанга, ультразвуковой контроль, ударные испытания.

DOI: 10.31857/S0130308221050080

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Методы неразрушающего контроля (НК) — это экономичные и вполне реализуемые методы, которые используются для обнаружения дефектов без разрушения детали [4, 5]. Основная цель неразрушающего контроля — удостовериться, что контролируемый объект пригоден для эксплуатации. Помимо дефектоскопии, с помощью неразрушающего контроля также можно определять и свойства материала [6]. Эхометод УЗК является наиболее предпочтительным методом неразрушающего контроля для определения свойств материалов. Этот метод требует небольших капиталовложений, в то время как чувствительность контроля гарантирует определение характеристик материала с разумным уровнем достоверности. Для исследования образца этот метод не требует подготовки обеих боковых поверхностей [7]. Эхометод используется для контроля эрозии, дефектов, химического контакта, подтверждения качества шва с внутренней и внешней стороны, определения характеристик материала, измерения глубины и т. д. Контроль конструкций в процессе эксплуатации с эхометодом позволяет спрогнозировать оставшийся эксплуатационный ресурс. Благодаря своевременно проведенной процедуре контроля возможно продлить срок службы, приняв конкретные действия для предотвращения аварии [8]. Микроструктурные свойства материала определяют такие механические свойства, как предел текучести, твердость, ударную вязкость и т.д. [9], а также по-разному влияют на коэффициент затухания ультразвука [10, 11]. Следовательно, параметры полученных ультразвуковых сигналов содержат неявную информацию о микроструктурных свойствах контролируемого образца.

Значительная работа была проведена по исследованию термической обработки сварного образца [12]. Литература показывает, что существует линейная зависимость между затуханием УЗ-сигнала и температурой, до которой нагреваются образцы. Термообработка при повышенных температурах приводит к увеличению размера зерен с линейным увеличением ударной вязкости. Однако меньшее количество работ связаны с исследованием зависимости между затуханием УЗ-сигнала и ударной вязкостью свариваемого материала с помощью метода неразрушающего контроля.

Эта исследовательская лакуна восполняется за счет использования перспективного метода частотно-временного анализа энергии, называемого преобразованием Гильберта Хуанга. Этот метод имеет потенциал для прогнозирования остаточного срока службы объекта путем анализа данных нелинейных и нестационарных сигналов [13]. Объединение методов разложения на эмпирические моды и спектрального анализа Гильберта называется преобразованием Гильберта—Хуанга (ПГХ) [14]. ПГХ обычно используется в радиолокационных системах мониторинга состояния и анализа изменений в окружающей среде [15]. В данном исследовании ПГХ используется для описания обратно отраженных и поглощенных эхосигналов, и была произведена оценка его эффективности.

Методология исследования, представленная в следующем разделе, заключается непосредственно в экспериментальной работе. Результаты эксперимента показывают текущее состояние образца, а также методики неразрушающего контроля (измерение затухания ультразвука) и разрушающего контроля (измерение ударной вязкости). ПГХ используется для определения характеристик отраженных и поглощенных эхосигналов в образцах сварных соединений. Установлено эмпирическое соотношение между составляющей ультразвукового сигнала и ударной вязкостью по отношению к температуре, при которой образцы подвергаются термообработке.

### **1.1. Методология исследования**

Целью данной работы является исследование механических свойств сварного участка низкоуглеродистой стали (E-6013) методом неразрушающего контроля с использованием перспективных методов обработки сигналов. Установлена взаимосвязь между механическими свойствами (ударной вязкостью) и параметрами УЗ-сигналов (затухание). Данные были получены при контроле термообработанных при различных температурах сварных образцов посредством УЗК. Механические свойства (ударная вязкость) определяют с помощью испытания на удар по Шарпи. Исследование также включает применение такой перспективной методики обработки сигналов, как ПГХ.

## **2. ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **2.1. Подготовка образцов**

В качестве сварочного электрода использовалась низкоуглеродистая сталь(НС) (E-6013). Дуговая сварка осуществляется на двух прямоугольных частях основного материала (низкоуглеродистой стали) электродом 10 SWG в виде стыковой сварки. Основной металл выполнен в виде прямоугольного параллелепипеда, имеющего размеры  $10 \times 10 \times 5,5$  мм согласно ASTM E23. Процесс сварки непосредственно оказывает влияние на основной металл, в результате чего в нем возникают три зоны нагрева. Область сварного шва, образованная после охлаждения сварочной ванны, известна как зона сплавления. Область, прилегающая к области сварного шва, известна как зона термического влияния. После сварки изменяются и свойства зоны термического влияния в то время, как материал основы остается неизменным. В данном исследовании зона сплавления подвергается разрушающему и ультразвуковому контролю.

### **2.2. Подготовка поверхности**

Гладкая и чистая поверхность без заусенцев идеально подходит для ультразвукового контроля. Гладкая и чистая поверхность позволяет получить ультразвуковой сигнал с меньшим шумом и погрешностями. Для получения гладкой поверхности у всех образцов использовались шлифовальный и полировальный станок. Кроме того, для шлифования и полирования использовалась наждачная бумага из карбида кремния с зернистостью 400, 600 и 1000 мкм и вода в качестве смазки.

### **2.3. Процедура термообработки**

Десять (10) образцов были подвергнуты термообработке в печи при температурах от 100 до 1000 °C с шагом 100 °C. Поскольку воздушное охлаждение помогает остановить процесс старения, каждый образец охлаждали на воздухе с постоянным временем выдержки в один час.

## 2.4. Фрезерный станок

После термообработки был использован фрезерный станок для создания V-образного паза глубиной 2 мм под углом 45 град в области сварного шва в соответствии со стандартом ASTM E23.

## 2.5. Ультразвуковой контроль

Для измерения ультразвуковых сигналов использовался цифровой ультразвуковой дефектоскоп Sona Test Master Scan model-350. В данной работе применялся эхометод, поскольку он сводит к минимуму подготовку поверхности и позволяет использовать для ультразвукового контроля только одну сторону детали. Ультразвуковые эхоимпульсы передавались преобразователем, эти импульсы проходили через материал образца, а принятые УЗ-сигналы передавались тем же преобразователем.

Затухание ультразвука измеряли с помощью преобразователя продольной волны 5 МГц контактного типа. Он годится как для отправки, так и для приема ультразвуковых импульсов. Преобразователь продольной волны также называют прямым датчиком, поскольку звуковая волна, генерируемая преобразователем, направлена перпендикулярно поверхности.

Значение скорости для низкоуглеродистой стали было установлено на 5920 м/с. Данные были в режиме полноволновой развертки при нулевом градусе. Чтобы уменьшить погрешности, один и тот же оператор прикладывал постоянное давление к УЗ-датчику для всех образцов в одинаковых окружающих условиях.

Запись результатов сканирования проводилась в виде А-сканов. А-скан — это одномерное графическое представление, показывающее изменение амплитуды сигнала во времени. По вертикальной и горизонтальной оси отложены соответственно амплитуда и время прихода УЗ-сигнала. Полученный сигнал, отображаемый на экране, показан на рис. 1. Ультразвуковые А-сканы были получены с использованием программного обеспечения SDMS (программное обеспечение для Master Scan 350). MATLAB® применяли для построения УЗ-сигналов с использованием перспективной методики обработки сигналов.

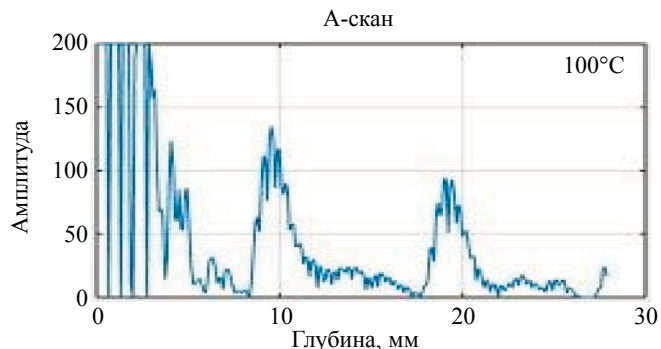


Рис. 1. А-скан для 100°C.

## 2.6. Испытание на удар

Испытание на удар (метод разрушающего контроля, РазК) задействовали для измерения ударной вязкости материала, а, особенно, способности поглощать энергию удара. Оборудование состоит из маятника и шкалы. Молоток весил 300 кг, был опущен с известной высоты. Нагрузка была приложена к образцу с V-образным надрезом, подготовленному по стандарту ISO 179-1: 2020 [16]. Ударными испытаниями определено его сопротивление разрушению. Энергия, поглощенная образцом до разрушения, может быть рассчитана непосредственно на шкале. Шкала показывает предел прочности образца при определенных условиях, таких как надрез.

## 2.7. Преобразование Гильберта—Хуанга

Метод ПГХ была разработан для оценки нелинейных искаженных волн, а также вариаций измеренных сигналов в нелинейных и нестационарных процессах. ПХГ включает в себя две

основных методики обработки сигналов: разложение по эмпирическим модам (РЭМ) и анализ спектра Гильберта. В этой работе ПГХ применялось к УЗ А-сканам, которые были получены на образце сварного шва из низкоуглеродистой стали. На первом этапе необходимо применить РЭМ, который раскладывает полученные сигналы на эмпирические моды (ЭМ), которые удовлетворяют основным условиям:

количество переходов через ноль и крайние значения сигналов в данных измерений должны быть равны или отличаться не более чем на единицу;

среднее значение огибающей сигнала, определяемой локальными максимумами и минимумами, равно нулю.

Процесс просеивания использовали для получения ЭМ. Реальный сигнал во временной области  $X(t)$  выражается уравнением:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \quad (1)$$

На следующем этапе к каждой рассчитанной ЭМ применяется преобразование Гильберта (ПГ) для анализа амплитуды и мгновенной нормированной частоты:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (2)$$

На последнем этапе получают частотно-временной энергетический спектр Гильберта:

$$H(w, t) = Re \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp(j \int w_i(t) dt). \quad (3)$$

Спектр Гильберта помогает получить трехмерный график частотно-временного распределения энергии. Спектра ПГ можно увидеть на рис. 2. Как видно на графике амплитудно-временной амплитуды, большая часть энергии сосредоточена в центре частотно-временного графика ПГ в области эхосигнала от задней стенки образца. Таким образом, интересующая область выбирается в области задней стенки, и это показывает, что энергии сосредоточены в нормированной полосе частот от 0,1 до 0,2 по оси  $y$  и приблизительно от 11 до 14 мм по оси  $x$  обратного эхосигнала. Энергия сконцентрирована в интересующей области для установления взаимосвязи между нагретым обработанным образцом из нержавеющей стали и энергией ПГХ. В связи с этим было выбрано небольшое окно (длиной примерно 3 мм), сконцентрированное в области обратного эхосигнала. Этот выбор делается после оценки общего спектра в каждом месте. Выбранные места должны быть одинаковыми для всех образцов перед выделением сигнала.

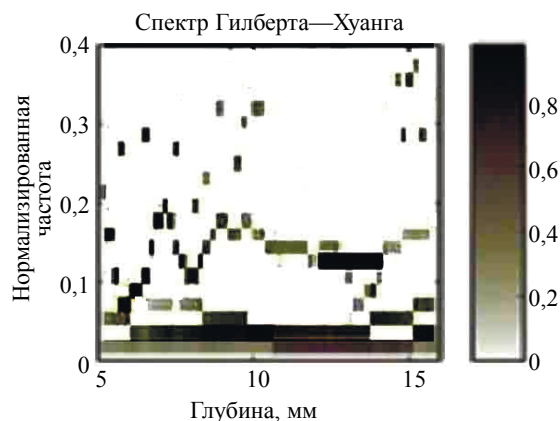


Рис. 2. Спектр ПГХ для 100°C.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Затухание ультразвука и ударная вязкость

Чтобы связать влияние механических свойств с результатами УЗК, был произведен расчет затухания ультразвукового сигнала по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{1}{d} 20 \log A1 / A2, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — затухание ультразвука, дБ/мм;  $d$  — глубина проплавления, мм;  $A1/A2$  — отношение амплитуд двух ультразвуковых волн, дБ.

Отношение было рассчитано с использованием MatLab. Значения затухания построены в зависимости от температуры термообработки, что показано на рис. 3.

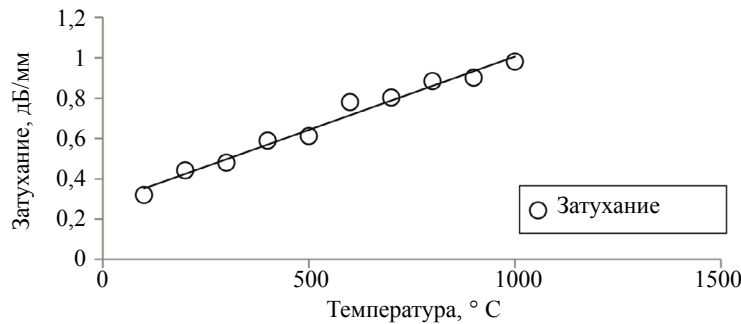


Рис. 3. Затухание ультразвука в зависимости от температуры термообработки.

На указанном рисунке видно, что затухание УЗ-сигнала прямо пропорционально увеличивается с увеличением температуры термообработки. Это подтверждает литературные данные о том, что размер зерна увеличивается с повышением температуры [17].

Кроме того, на рис. 4 видно, что энергия Шарпи увеличивается с увеличением температуры термообработки, что указывает на большой размер зерна в свариваемом материале. Поэтому материал становится пластичным и требует больше энергии для разрушения.

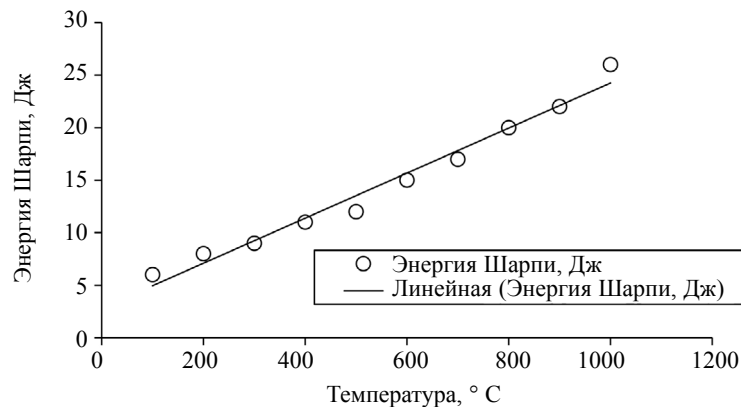


Рис. 4. Зависимость энергии Шарпи от температуры термообработки.

Как показано на рис. 5, возрастающая зависимость связывает затуханию УЗ-сигнала и ударную вязкость. Такая зависимость позволяет контролеру связать ударную вязкость сварного участка с ультразвуковыми свойствами в процессе контроля.

Как показано на рис. 3—5, затухание и ударная вязкость повышаются с увеличением температуры термообработки из-за увеличения размера зерна. Установлено, что в результате термической

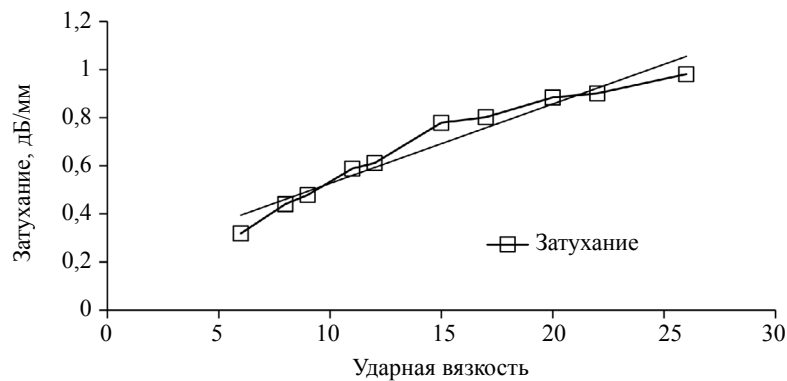


Рис. 5. Зависимость между затуханием ультразвука и ударной вязкостью.

обработки размер зерна становится большим, что делает материал пластичным и увеличивает его сопротивление разрушению [18].

Энергия Гильберта вычисляется с использованием ПГХ для УЗ-сигналов, полученных от сварных образцов. Сумма всех энергий ПГХ, сосредоточенных в интересующей области, была рассчитана и построена в зависимости от температур термообработки. На рис. 6 суммирование энергии при интегрировании в интересующей области устанавливает взаимосвязь между температурой термообработки (искусственное старение) и энергией ПГХ. Можно отметить, что энергия ПГХ уменьшается с повышением температуры термообработки из-за большего размера зерна и, следовательно, обеспечивает большее сопротивление, когда сигналы проходят через объект контроля. Из-за изменения микроструктуры материала при увеличении температуры, а также отражения и преломления на границах зерен, УЗ-сигналы больше поглощаются при распространении в объекте контроля. Следовательно, можно предсказать, что уменьшение энергии ПГХ при высоких температурах может вызвать снижение пластичности материала с увеличением прочности и может привести к пластической деформации перед разрушением [18].

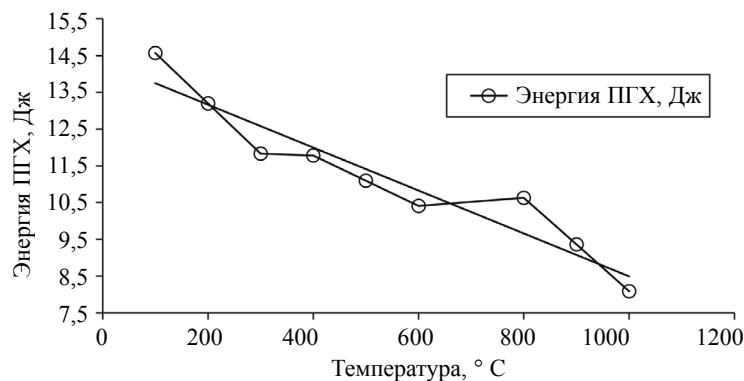


Рис. 6. Зависимость между энергией ПГХ и температурой термообработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе с помощью УЗК были определены механические свойства сварных образцов из низкоуглеродистой стали, подвергнутых термообработке при различных температурах, особенно когда объекты подвергаются различным процессам старения. Следовательно, устанавливается корреляция между ударной вязкостью (РазК) и затуханием ультразвука (НК) сварных швов, подверженных старению при разных температурах. Механические свойства материала определены при различных температурах с помощью метода испытания по Шарпи. Оценка низкоуглеродистой термообработанной стали после сварки проводится с использованием УЗК. Процесс термической обработки или искусственного старения изменяет как механические свойства, так и характеристи-

ки ультразвуковых сигналов, поэтому эта предложенная взаимосвязь помогает дефектоскописту связать ударную вязкость сварного участка с затуханием во время процедуры контроля. Работа также направлена на получение взаимосвязи между температурой, при которой производится старение термообработанного образца и ПГХ. Наблюдается, что энергия ПГХ уменьшается с увеличением температуры термообработки, что является причиной крупных зерен в материале и, следовательно, приводит к большему сопротивлению к распространению сигнала. Эта зависимость также показывает, что методы НК могут использоваться для оценки механических свойств сварных термически состаренных материалов и позволяет инспекторам по качеству лучше проводить техническое обслуживание. Вышеуказанная методика эксперимента также может использоваться для определения и сравнения других механических свойств и их корреляции путем изменения процедуры термообработки, сварного материала, типа сварки, соединений и использования различных механических испытаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dorbane A., Mansoor B., Ayoub G., Shunmugas V.C., Imad A.* Mechanical, Microstructural and fracture properties of dissimilar welds produced by friction stir welding of AZ 3113 and AL 6061 // *Material Science & Engineering A*. 2016. V. 651. P. 720—733. ELSEVIER.
2. *Li Bo, Yufi Shen, Weiye Hu.* The study of defects in Aluminum 2219-T6 thick butt friction stir welds with the application of multiple Non Destructive testing methods // *Material & Design*. 2011. V. 32 (4). P. 2073—2084
3. *Fadare D.A., Fadara T.G., Akanbi O.Y.* Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel // *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2011. V. 10. No. 3. P. 299—308.
4. *Khan Tariq Mairaj, Khan Sohaib Z.* Assesment of material properties of AISI 316L stainless steel using non destructive testing // *Karachi*. 2016. V. 31. Is. 4.
5. *Srivastava Bipin Kumar.* A Review oneffect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on mechanical behaviour of ferrous metals // *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010. V. 2 (4). No. 0975—5462. P. 625—631.
6. *Nanekar P.P., Shah B.K.* Characterization of Material Properties by Ultrasonics // *BARC Newsletter*. 2004. No. 249. P. 25—36.
7. *Chern E. James.* An improved ultrasonic image presentation // *Quantitative Non Destructive Evaluation*. 1995. V. 14. P. 889—892.
8. *Khan Tariq Mairaj, Maqsood A., Warraich S.A., Khalid S.* Postweld Heat Treatment Characterization of Mild Steel (E6013) Welded Areas Using Wavelet Transform of Ultrasonic Testing Signals // *Journal of Testing and Evaluation*. 2018. V. 5. P. 46.
9. *Khan Sohaib Z., Khan Tariq M., Joya Yasir F., Khan Muhammad A., Ahmed Sarah, Shah Aqueel.* Assessment of material properties of AISI 316L stainless steel using non-destructive testing // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016. P. 360—370.
10. *Dragan K., Katunin A., Dziendzikowski M.* Damage Identification in Aircraft Composite Structures: A case study using various Non Destructive Testing Techniques. 2015. DOI: 10.1016/J. COMPSTRUCT 2015.02.080
11. NDT Resource Center. [www.nde-ed.org](http://www.nde-ed.org)
12. *Moura Cassio Melo.* Evaluation of the Ductile to Brittle Transition Temperature in Steel Low Carbon, Brazil: Rio De Janeiro, 2009. INIS -BR-6370.
13. *Yang G., Khan T., Zhang L., Dib G., Xin J., Udpa L., Majumdar S., Udpa S., Kim J.* Pre-processing methods for eddy current data analysis using Hilbert-Huang Transform // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2012. V. 39.1. P. 389—395.
14. *Khan Tariq, Majumdar Shantanu, Udpa Lalita.* Automated flaw detection scheme for cast austenitic stainless steel weld specimens using Hilbert-Huang transform of ultrasonic phased array data // *AIP Conference Proceedings*. 2012. V. 1430. P. 1.
15. *Ali M. Ghazanfar, Warriach Saad, Khan Tariq Mairaj.* Evaluation of the aging effect on mild steel (E 6013) welded area using Hilbert Huang Transform on UT signals. Karachi: IEEE, 2016.
16. British Standards Institution. *Plastics — determination of charpy impact properties. Part 1. Non-instrumented impact test (ISO 179-1:2010)*. British Standards Institution, 2010.
17. *Gao Weimin, Glorieux Christ.* et al. Investigation of the microstructure of cast iron by laser ultrasonic surface wave spectroscopy, in material science and engineering. ELSEVIER. A313. 2001. P. 170—179.
18. *Naqvi Z.A., Khan T.M.R., Ali M. Ghazanfar* et al. Evaluation of heat treatment effect on impact strenght of glass fiber-reinforced composite material using NDT technique in material performance and characterization // *ASTM*. 2020. V. 9 (1). P. 72—81.