

УДК 669.1/89:534(03)

ТРЕБОВАНИЯ К МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СПЕКТРАЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ПЛАСТИН СПЛАВА Ni-Co

А.И. Шевченко, доктор технических наук, ведущий инженер Главной астрономической обсерватории НАН Украины, г. Киев



Контроль качества металлов требует проведения измерений и поэтому тесно связан с метрологией. Задачей метрологии для контроля качества является обоснование диапазонов измерений и требований к их точности.

Разработан спектральный ультразвуковой метод контроля качества пластин. Приведены ультразвуковые спектрограммы, которые свидетельствуют об изменении спектров ультразвука для выбранных диапазонов частот при его прохождении сквозь пластины Ni-Co различной структуры.

The quality control of metals requires carried out measurement and is therefore closely related to metrology. The task of metrology for quality control is to justify the measurement ranges and the requirements for their accuracy. A spectral ultrasonic method for controlling the quality of plates has been developed. Ultrasonic spectrograms that indicate a change in the ultrasound spectra for the selected frequency ranges at its passing through Ni-Co plates of different structures are given.

Задачей работы является исследование метода регистрации отличительных признаков и характерных особенностей ультразвуковых (УЗ) спектрограмм, по которым можно определить качество пластин литья и проката из сплава, содержащего Ni-Co. Метод позволяет выбрать наиболее информативный диапазон частот и предусматривался как дополнительный метод для экспертного заключения о качестве металла.

Подготовка материала

Готовились литые образцы сплава Ni-Co. Часть металла плавил в вакууме при давлении $1 \cdot 10^{-2}$ атмосферы, другую часть — в атмосфере аргона при давлении 0,2 избыточные атмосферы. Образцы,

выплавленные в вакууме, оказались плохого качества, возможно, за счет выделяющихся из металла газов. Под плохим качеством подразумевается наличие дефектов площадью более 6 мм². При этом, общая площадь дефектных участков не должна превышать 5 % от площади пластины. Литые образцы подвергались прокатке. Размеры пластин прокатанных образцов в среднем 377x124x4 мм. Средняя твердость сплава 19,6 МПа (200 кг/мм²). Были исследованы образцы пластин № 52, 56, 61, 62, 69, 70, в том числе подвергнутые отжигу при температуре 900 °С в течение 1 ч (№ 56). Всего было выплавлено и исследовано 17 пластин. При 700 °С качество проката оказалось плохим. Лучшее качество проката было при температуре отжига 1100 °С в пластине № 62, металл стал более пластичным. Основная масса образцов каталась со стальной обечайкой, а некоторые — без обечайки. Качество проката без стальной обечайки неудовлетворительное.

Для получения количественных данных относительно параметров исследуемых образцов проводились измерения характеристик распространения УЗ. На некоторых образцах измеряли продольную скорость УЗ c_l . На литом (непрокатанном образце) продольная скорость звука минимальная — $c_l = 5230$ м/с, на некачественных прокатанных образцах — до $c_l = 5555$ м/с, на качественных максимальная — $c_l = 6000$ м/с. Сложность отработки технологии и контроля качества объясняется неоднозначным влиянием нескольких технологических факторов на однородность и плотность распределения дефектов как по площади прокатанных пластин, так и по высоте литого образца.

Основные виды нарушений сплошности, обнаруживаемых при контроле литых изделий, следующие [1]: газовые раковины, усадочные рыхлости и пористость, флокены и трещины литейные. Газовые раковины — это сферические пустоты с гладкой блестящей поверхностью, расположенные снаружи отливки или внутри ее. Усадочная рыхлость в изломе представляет собой скопление несплошностей неправильной формы, проявляющихся

в виде отдельных участков с пористым ноздреватым строением. *Усадочная пористость* представляет собой рассредоточенную группу мелких пустот, образующихся в результате усадки металла при затвердевании. Флокены представляют собой внутренние трещины, имеющие вид округлых хлопьев диаметром от десятых долей миллиметра до 30...50 мм.

После проката пластины фрезеровались с одной стороны, предназначенной для УЗ-контроля.

Исследования

Технология проката образца № 70 такова, что способствует образованию трещин внутри металла и неоднородному по величине зерна качеству металла. Однако внутри этих первичных зерен, образующихся при кристаллизации, присутствуют еще границы двойников, образование которых связано с фазовым превращением кристаллических решеток из гранцентрированной кубической A_1 в гексагональную плотноупакованную A_2 (ГПУ). При охлаждении имеет место сильная текстуризация материала с ориентировкой зерен по плоскостям $\{220\}$, $\{1120\}$ вблизи поверхности пластины. Причем межплоскостные расстояния для этих плоскостей Гука ГПУ-решеток различаются незначительно. В связи с этим, помимо ультразвукового, проводились также рентгенографические и визуальные исследования.

Визуальное исследование Ni-Co проводилось с помощью микроскопа УМ-23 с увеличением в 31 раз. Макроструктура образцов, выявленная электрохимическим травлением, образована относительно крупными зёрнами 0,5...4 мм.

Рентгенографический метод. Исследование пластин проходило рентгенографическим методом в ИЭС им Е. О. Патона на аппарате РАП 150–300–10 на пленке РТ-5 с диаметром проволок эталонов чувствительности от 0,05 до 4,0 мм. Относительная погрешность рентгенографического метода определения диаметра поры размером 1 мм составляет 5 %.

Пластина № 62 — одна из худших по результатам радиографического контроля. Сплав выплавлен в вакууме при давлении $p = 1 \cdot 10^{-2}$ атм. На поверхности мало трещин, но много расплюснутых газовых полостей. Внутри трещин и мелких пор нет. Большие раковины имеют вид кометы. Присутствуют газовая полость диаметром 8...10 мм и поры диаметром до 8 мм. Всего 12 полостей, две поры, три области рыхлот (компактное расположение пор) с диаметром пор 2 мм. Продольная скорость УЗ — $c_1 = 6000$ м/с.

Пластина № 69 по результатам радиографического контроля — самая качественная. Присутствуют около шести трещин с обеих сторон пластины, одна пора диаметром 2 мм, небольшая газовая пористость (скопление мелких пор). Сплав выплавлен в атмосфере аргона. Разброс пор, рыхлот, газовых полостей случаен и систематизации не поддается.

В некоторых местах металл был хорошего качества, а рядом — полностью бракованный.

Ультразвуковой метод. Методика предназначена для контроля качества проката в производственных условиях [1–5]. Методика основана на анализе дефектов изделия продольными УЗ-волнами с помощью раздельно-совмещенного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) марки П112–5–3·4–002 (контактный, прямой, раздельно-совмещенный). В контрольное изделие посылаются упругие колебания и регистрируется их интенсивность после двукратного прохождения через изделие (способ № 1) или однократного (способ № 2) [4–10]. Диапазон скоростей c_1 распространения продольных ультразвуковых колебаний в контролируемом материале для П112–5–3·4–002 должен быть в пределах 2240...6700 м/с. Преобразователь подключен к УЗ-дефектоскопу УД2–12 (ГОСТ 23049–84). Частота УЗ — $f = 5$ МГц. По требованию УЗ-контроля шероховатость поверхности Rz (высота неровностей профиля по десяти точкам) должна быть не более 250 мкм, а радиус кривизны — не менее 100 мм при Ra 25 мкм (среднеарифметическое отклонение профиля). Функция влияния акустического контакта Φ_a на отклонение условной чувствительности должна быть не более 1 дБ. В экспериментах использовались шлифованные образцы с требованиями к качеству поверхности: $Rz = 250$ мкм, $Ra = 2,5$ мкм, так что функция влияния акустического контакта была не более 1 дБ. В качестве смазки использовалось индустриальное масло (ГОСТ 20799–75). Одновременно уточнялись вид, размеры и размещение дефектов методом рентгеновского просвечивания, УЗ зеркально-теневым, при контроле одним ПЭП с одной стороны пластины (способ № 1) и эхо-теневым методом, двумя ПЭП при контроле с двух сторон пластины (способ № 2).

Основные измеряемые характеристики выявляемого дефекта приведены в ГОСТ 14782–86 [3]. Дополнительной характеристикой выявленного дефекта являются его конфигурация и ориентация, а также спектр сигналов, отраженных от дефектов.

Коэффициент затухания вычисляется по формуле [7]

$$\delta = \frac{1}{2l} \cdot \ln \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \right),$$

где l — длина прозвучиваемого образца; A_n , A_{n+1} — амплитуды двух последовательных сигналов.

В качестве параметров, по которым оценивалось качество на рентгенографических снимках, принималось количество пор, раковин и полостей в металле. На основе этого параметра было проведено разделение слитков на шесть групп. Лучшее качество — в первой группе, худшее — в шестой. Параметрами сигналов при ультразвуковом контроле были выбраны [6–9]:

амплитуда отраженного сигнала при зеркально-теневом методе контроля;

количество отражений УЗ-сигнала от противоположной стороны образца;

скорость затухания амплитуды сигнала от количества отражений; количество помех, в том числе отражений неосновной частоты.

Результаты УЗ-контроля зеркально-теневым методом не коррелируют с результатами рентгенографического контроля. Объяснить этот факт может предположение, что чем больше выделилось газов и осталось в металле в виде пузырей, тем качество металла, свободного от пор, лучше. УЗ лучше распространяется в таком объеме металла за счет большей плотности и лучшей структуры металла. В целом рентгенографический контроль дает отрицательные результаты для такой пластины. Совпадают результаты этих двух методов контроля только для явно бракованных образцов.

По паспортным данным абсолютная чувствительность дефектоскопа с ПЭП П111–1,25-К20–002 — не менее 100 дБ. Максимальная чувствительность приемника на номинальных частотах — 150 мкВ. Отклонение максимальной чувствительности приемника на номинальных частотах — не более ± 2 дБ. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения амплитуд сигналов на входе приемника дефектоскопа по цифровому индикатору на частотах от 1,25 до 5 МГц составляет $\pm (0,2 + 0,03 N)$, где N — номинальное значение измеряемой величины. Оценка относительной погрешности для толщины пластины 10 мм и скорости УЗ $c_1 = 5000$ м/с, проведенная автором, составляет 12 %.

Спектральный ультразвуковой метод. В этом методе сигнал с выхода ПЭП подавался на вход спектроанализатора СК4–59 (ЕЭ1.406.055 ТУ). Спектроанализатор СК4–59 относится к последовательным анализаторам, у которых есть следящий генератор (СГ), который перенастраивается (управляет анализатором спектра) одновременно с приемником. Спектроанализатор СК4–59, таким образом, может использоваться для контроля амплитудно-частотной характеристики, что и было проведено в этой работе. Мгновенная частота колебаний на выходе СГ точно равняется частоте, на которую в данный момент времени настроен полосовой фильтр анализатора спектра. На выход генератора подается широкая полоса частот, которая потом приходит на УЗ-преобразователь. Полоса частот СГ выбирается в соответствии с полосой частот от 0,01 до 2 МГц или 5 МГц. Уровень собственных шумов — 0,71 мкВ ($\sigma_f = 1$ кГц), динамический диапазон — 70 дБ, граничная основная погрешность — $\pm (4...6)$ %, полоса частот — 0,01...110 МГц, полоса пропускания на уровне 3 дБ — $(1 \cdot 10^2...3 \cdot 10^5)$ Гц, полоса обзора — 0...110 МГц с шагом 1, 5, 200 кГц. Спектроанализатор СК4–59 был настроен таким образом, как показано в таблице. Как более информативный, принят способ № 1, поскольку сигнал проходит по телу пластины два

раза, до противоположной грани пластины и обратно, и поэтому сильнее ослабляется за счет переотражения при прохождении в большем объеме металла.

Погрешность СК4–59: измерения относительных уровней — 4...6 %; установки частоты — $\pm(10-6f+P+1/T)$ Гц, где T — время измерения, (по переключателю ВРЕМЯ СЧЕТА, мкс); f — измеряемая частота, кГц; P — полоса пропускания (по переключателю ПОЛОСА, кГц), $P = 1$ кГц; динамический диапазон по интермодуляционным искажениям — 70 дБ; неравномерность АЧХ — ± 1 дБ; разрешающая способность — 100 Гц.

Режим измерения на СК4–59

Режим измерения	Величины (положения переключателей прибора)
Ослабление, дБ	“10”
Величина частоты на деление	“1 МГц”
Обзор	“На деление”
Полоса частот, кГц	“100”
Время счета, мс	“20”
Усиление (логарифмическое/линейное)	“Линейное”
Уровень, дБ мВ	“200”
Развертка скорость	“0,2 о/дел”
Запуск	Автоматически
Видеофильтр	“10 кГц”
Тумблер ФАПЧ	Верхнее
Память	Режим с длительной памятью. Стирание производится кнопкой + (работать с режимом развертки не менее 50 мс/дел)
Номинальный уровень	“80 мВ”
Измерение	“Метка”
Вид	Внутренний

По оценке результатов измерений, проведенной автором, граничная относительная погрешность измерений амплитуды частот, по которым прогнозируются диаметры пор, равняется $\delta_n = 5$ %.

На рис. 1 и 2 показаны полученные спектрограммы. Цена одной клетки на оси частот на рисунках — 1 МГц.

Обозначения, принятые на рис. 1: а — пластина: прокат № 3, плавка № 69; сквозное прозвучивание по способу № 2 двумя преобразователями № 89 и № 100 марки П1123·4–002 (эхо-теневой метод); толщина пластины $\delta = 4,28$ мм; $c_1 = 6000$ м/с; б — прозвучивание по способу № 1 одним преобразователем № 89 П1123·4–002 с лицевой стороны пластины, цена деления 1 МГц.

На рис. 1 сравниваются два варианта спектрограмм: при прозвучивании пластины одним преобразователем по способу № 1 (рис. 1а), и двумя преобразователями — по способу № 2 (рис. 1б).

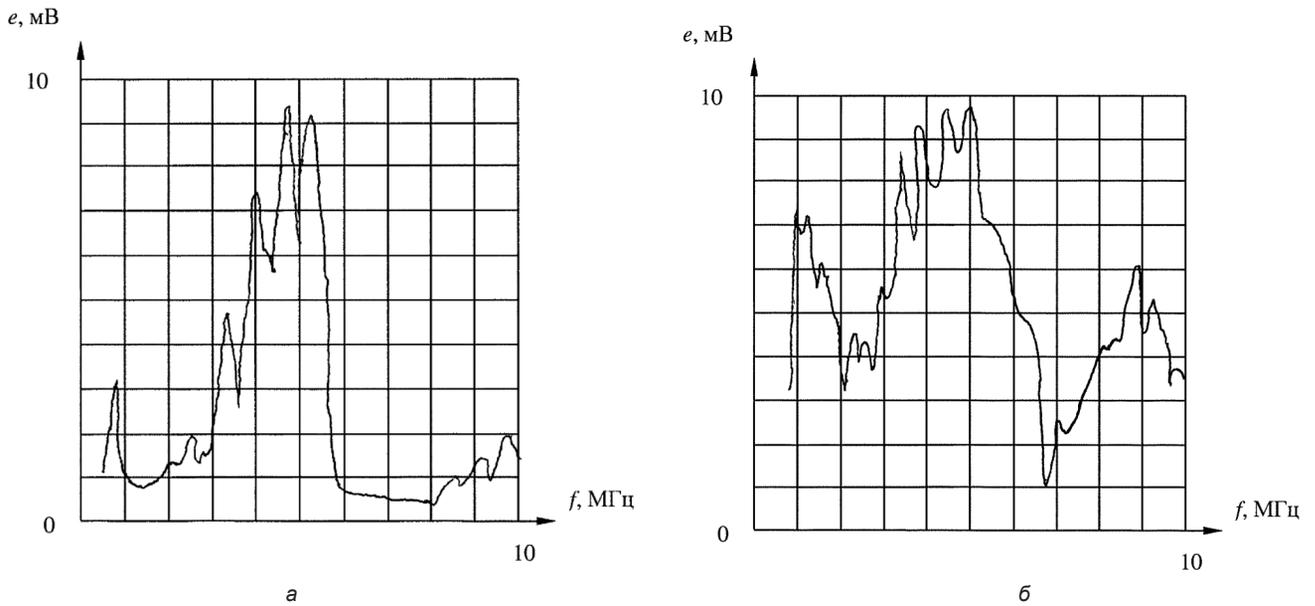


Рис. 1. Спектрограммы для качественных пластин

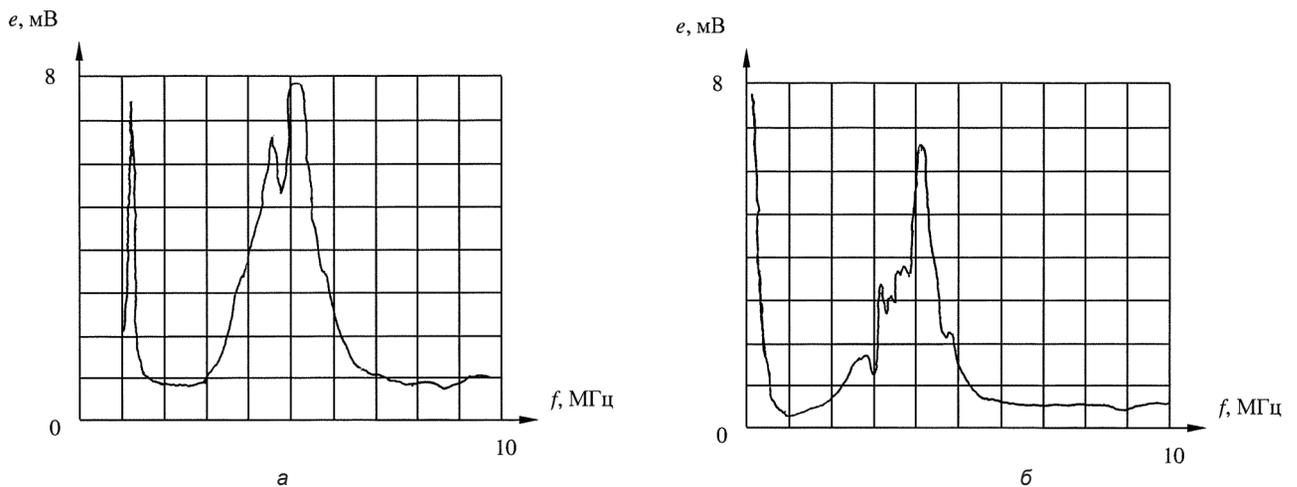


Рис. 2. Спектрограммы для некачественных пластин № 70 и № 56

Обозначения, принятые на рис. 2: а — плавка № 70, $\delta = 6,00$ мм; прозвучивание одним преобразователем № 89 П1123·4–002 с лицевой стороны пластины; б — плавка № 56, $\delta = 5,00$ мм; прозвучивание одним преобразователем № 89 П1123·4–002 с лицевой стороны пластины; отжиг пластины при 750 °С в течение 10 мин.

Результаты

Анализ рисунков показывает, что окно прохождения сигналов УЗ до противоположной грани и обратно составляет 3043...7043 кГц.

Частоты выше 7043 кГц и ниже 3043 кГц при одинарном прозвучивании затухают. Далее отмечается такая особенность. При наложении рис. 1а на рис. 1б обнаруживается, что частотные пики на рис. 1а совпадают по частоте с провалами частоты на рис. 1б. Совпадение частотных пиков и провалов по частоте при прозвучивании способами № 1 и № 2, возможно, объясняется дифракцией, интерференцией и наложением УЗ-волн первого (прямо-

го луча) и второго (обратного луча) на одних и тех же порах и дефектах.

Анализ спектрограмм показывает следующее. Начиная с частоты 8 МГц и выше, амплитуды сигналов с понижением качества металла уменьшаются. При частотах ниже 4 МГц амплитуды сигналов на плохих образцах также резко уменьшаются. По качеству образец № 69 является лучшим.

На рис. 2а показана спектрограмма образца плавки № 70 пластины толщиной $\delta = 6,0$ мм, прозвученного по способу № 1 одним преобразователем.

Эта пластина, в отличие от предыдущей, прокатывалась без стальной обечайки. Такая форма сигнала характерна для плохого качества металла.

Технология проката для образца плавки № 70 такова, что способствует образованию трещин внутри металла и неоднородному качеству по величине зерна. Но по результатам рентгенографического контроля пластина № 70 значительно лучше пластины № 62. Сравнение продольных скоростей УЗ в пластинах плавков № 70, № 69 и № 56 дает следующие значения: 5530; 6000; 5555 м/с соответственно.

Плотность пластины № 70 — $\rho = 8540 \text{ кг/м}^3$. Съемки с экрана осциллографа СК4–59 были сделаны на фотопленке 225 е, диаграмма раскрытая, выдержка — 2...3 с, расстояние — 30 см.

Необходимо различать шумы от трещин и от зерен. В стандарте [4] частота ультразвукового контроля выбирается в соответствии с условием: $4 < \lambda/d < 15$, где d — средний размер зерна, λ — длина волны УЗ, мм.

Отношение максимума сигнала качественного образца (рис. 1б) в районе 5,5 МГц и в районе 10 МГц равно 0,62, что соответствует затуханию 5,8 дБ.

Отношение сигнала некачественного образца (рис. 2б) при 5,5 МГц и качественного (рис. 1б) для 5,5 МГц равняется 0,66, что соответствует затуханию 3,7 дБ. На некачественном образце (рис. 2б) сигнал в районе 10 МГц практически исчезает.

Для плавки № 56 (самая плохая пластина по порам) значения “гребенки” максимумов частот f следующие (рис. 1б), слева направо: 3971; 4679; 5049; 5556 кГц. Если принять для этой пластины $c_1 = 5530 \text{ м/с}$, то из формулы $\lambda = c_1 / f$ для длины УЗ-волны λ на каждой частоте f получим: $\lambda_1 = 1,393 \text{ мм}$; $\lambda_2 = 1,182 \text{ мм}$; $\lambda_3 = 1,095 \text{ мм}$; $\lambda_4 = 0,995 \text{ мм}$. Можно допустить, что затухание УЗ на некоторых частотах происходит на неоднородностях следующих размеров: $\Delta\lambda_1 = \lambda_1 - \lambda_2 = 0,211 \text{ мм}$; $\Delta\lambda_2 = 0,087 \text{ мм}$; $\Delta\lambda_3 = 0,1 \text{ мм}$. При прозвучивании одним преобразователем сигнал отражается от включений и поэтому его амплитуда максимальная, а на других частотах присутствует поглощение, боковое отражение, дифракция и интерференция УЗ-волны. Для уточнения методики измерения необходимо проанализировать различия механизмов прохождения УЗ-волны в пустотах и неоднородности кристаллической решетки.

Параметром, по которому судят о качестве пластины, является площадь под огибающей частот на экране осциллографа. Через максимумы наибольших частот проводится огибающая их линия. Математически это записывается следующим образом:

$$S_f = \int_{v_1}^{v_2} f(A_v)df,$$

где $f(A_v)$ — функция огибающей спектрограммы, v_1 , v_2 — начало и конец частот для функции огибающей соответственно.

Граничная относительная погрешность измерения величины дефектного участка пластин S_f составляет $\delta_{\text{н}} = 8 \%$.

Выводы

Разработан спектральный ультразвуковой метод контроля качества пластин. Приведены УЗ-спектрограммы, которые свидетельствуют об изменении спектров ультразвука при прохождении его сквозь пластины Ni-Co различных структуры и ка-

чества. При контроле одних и тех же участков пластин получено удовлетворительное совпадение разных методов контроля. Проведено сравнение результатов контроля качества пластин литья и проката Ni-Co рентгенографическим, визуальным, ультразвуковыми эхо-теневым и зеркально-теневым методами и новым спектральным ультразвуковым методом. Проведение измерений рентгенографическим и спектральным ультразвуковым методом показало удовлетворительное совпадение результатов по качеству металла.

Показано, что оптимальный выбор диапазонов частот и величины усиления амплитуды сигналов позволяет получить приемлемые результаты контроля ультразвуковым спектральным методом.

Список литературы

1. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении: учеб. пособие. — СПб.: Радиоавионика, 1995. — 317 с.
2. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования: ГОСТ 26266–90. — [Введ. 1991–01–01]. — М.: Стандартиформ. — 19 с. — (Межгосударственный стандарт).
3. Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные. Методы ультразвуковые: ГОСТ 18576–96. — [Введ. 2002–01–01]. — Минск. — 31 с. — (Межгосударственный стандарт).
4. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые: ГОСТ 14782–86. — [Введ. 1988–01–01]. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — М.: Стандартиформ, 2005. — 43 с.
5. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна (СТ СЭВ 1959–79): ГОСТ 5639–82. — [Введ. 1983–01–01]. — М.: Изд-во стандартов, 2003. — 21 с.
6. Межгосударственный стандарт. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний: ГОСТ 23702–90. — [Введ. 1992–01–01]. — М.: Изд-во стандартов, 1992, 2003. — 34 с. — (Межгосударственный стандарт).
7. Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник / под ред. Г.С. Самойловича. — М.: Машиностроение, 1976. — 456 с.
8. Шаратов В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шаратов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шаропова; под ред. В. М. Шаропова. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
9. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука: учеб. пособие / В. А. Шутилов. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. — 280 с.
10. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов: справ. изд.; пер. с нем. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. — М.: Металлургия, 1991. — 752 с.