УДК 620.179.16

Д. И. Холодилин*

МЕХАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Статья посвящена вопросам автоматизации и механизации процессов ультразвуковой дефектоскопии листового металлопроката. Рассматриваются современные методы повышения эффективности

---

* Работа выполнена под руководством доктора технических наук, профессора кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ» М. В. Соколова.

контрольных операций, минимизации человеческого фактора и улучшения качества продукции. Описаны передовые технологии, применяемые на крупных металлургических предприятиях России и мира.

Металлопрокат является одним из важнейших видов сырья в промышленности. Качество листового проката напрямую влияет на надежность изделий машиностроения, строительства и многих других отраслей экономики. Одним из ключевых методов оценки состояния материала является ультразвуковая дефектоскопия, позволяющая выявить внутренние дефекты, трещины и пороки структуры металла [1].

Ультразвуковая дефектоскопия – это метод неразрушающего контроля материалов и изделий, использующий ультразвуковые волны для обнаружения дефектов внутри материала. Этот метод основан на способности ультразвука проникать глубоко внутрь материала и отражаться от границ раздела сред различной плотности (например, от трещин, пор, расслоений). При проведении ультразвуковой дефектоскопии специальный прибор – дефектоскоп – генерирует ультразвуковые импульсы, которые направляются в исследуемый объект. Эти импульсы проходят сквозь материал и частично отражаются обратно, если встречаются с дефектами или границами слоев. Полученный сигнал обрабатывается аппаратурой, позволяя определить наличие, форму и размеры дефектов. Ультразвуковая дефектоскопия обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами неразрушающего контроля, такими как рентгенография, магнитная дефектоскопия и визуальный контроль. Вот некоторые ключевые плюсы.

1. *Глубокая проникающая способность*. Ультразвук способен обнаруживать дефекты глубоко внутри материала, обеспечивая проверку толщин вплоть до десятков сантиметров. Это особенно важно для крупногабаритных конструкций и массивных элементов.

2. *Чувствительность к различным видам дефектов*. Метод эффективно выявляет трещины, поры, расслоения, включения посторонних веществ и другие внутренние нарушения структуры материала. Это обеспечивает комплексную оценку состояния изделия.

3. *Неразрушаемость*. Контроль осуществляется без повреждения контролируемого объекта, что позволяет многократно проверять изделие на разных этапах производства и эксплуатации.

4. *Отсутствие радиационного воздействия*. В отличие от рентгенографии, ультразвуковая дефектоскопия не требует специальных мер защиты персонала от излучения, что снижает риски для здоровья операторов и упрощает организацию работ.

5. *Высокая скорость обследования*. Процесс дефектоскопии занимает относительно немного времени, что значительно ускоряет производство и техническое обслуживание оборудования.

6. *Универсальность*. Подходит практически для любых твердых материалов: металлов, пластмасс, композитов, керамики и даже бетона. Это расширяет область применения метода в различных отраслях промышленности.

7. *Компактность оборудования*. Современные приборы компактны и мобильны, что облегчает проведение обследований непосредственно на месте установки оборудования или строительных площадках.

Эти преимущества делают ультразвуковую дефектоскопию одним из наиболее востребованных методов контроля качества продукции и техники в современном мире.

Ультразвуковая дефектоскопия способна выявить широкий спектр внутренних и поверхностных дефектов, включая: трещины (продольные и поперечные трещины, возникающие вследствие механических нагрузок, усталости металла или температурных воздействий) и микротрещины, невидимые визуально, но представляющие потенциальную угрозу прочности конструкции; пористость (наличие мелких воздушных полостей в материале, образующихся в процессе литья, сварки или обработки давлением); расслоение (нарушение однородности материала, приводящее к образованию пустот между слоями или зернами кристаллической решетки); включения (присутствие посторонних частиц (шлак, песок, оксиды и др.) внутри материала, снижающие его прочность и долговечность; полости и раковины (объемные дефекты, вызванные неравномерностью заполнения расплава или газовыделением при затвердевании материала; неправильная структура сварного шва (недостаточная проплавленность, прожоги, подрезы и прочие отклонения от нормативных требований; каверны и коррозионные повреждения (разрушения материала, обусловленные химическими реакциями с агрессивными веществами внешней среды).

Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов позволяет выявить целый ряд распространенных дефектов, которые могут существенно повлиять на надежность и безопасность соединения. Рассмотрим подробнее, какие именно проблемы могут быть обнаружены данным методом, например несплавление.

Это одна из наиболее опасных категорий дефектов, возникающих в результате недостаточного нагрева зоны плавления. Типичные виды несплавлений включают:

– несплавление основного металла – отсутствие полного слияния наплавленного металла с основным материалом;

– несплавление кромок – неполное соединение свариваемых поверхностей друг с другом.

Непровары возникают, когда металл недостаточно проварился в глубине шва. Такие дефекты снижают механическую прочность и устойчивость конструкции к нагрузкам. Выделяют два основных типа.

1. Поверхностный непровар – локализуется ближе к поверхности сварного шва.

2. Корневой непровар – расположен глубже, часто на границе корня шва.

Пористость – это присутствие газовых пузырьков в металле шва, снижает качество соединения. Они образуются в результате попадания воздуха, влаги или примесей в зону сварки. Можно различить:

– отдельные поры – единичные полости небольшого размера;

– цепочки и скопления пор – группы отверстий, ухудшающие механические свойства.

Свищи – это крупные сквозные отверстия, возникшие в результате проникновения газов или шлака через весь шов. Свищи ослабляют конструкцию и приводят к утечкам жидкостей или газов.

Шлаковые включения проявляется образованием неоднородностей в структуре шва из-за остатков шлаков, которые не были удалены вовремя. Шлак снижает прочность соединения и повышает риск разрушения под нагрузкой.

Расслоения и отслаивания представляют собой нарушение адгезии (прилипания) сварочной ванны к основному металлу. Могут возникать при неправильном подборе электродов, нарушениях технологии сварки или несоответствии режима сварки требованиям материала.

Дефекты геометрического характера также определяются с помощью ультразвукового контроля, хотя чаще фиксируются визуально или измерительными приборами. Например: перегрев – локальное изменение свойств металла, вызванное избыточным нагревом в зоне сварки. Деформации – искривления профиля шва, волнистость, коробление.

Использование ультразвука позволяет избежать дорогостоящих разрушений и отказов конструкций, обеспечивая надежную диагностику внутренних дефектов, не видимых глазу. Особенно актуально применение этого метода в критически важных областях, таких как строительство мостов, кораблей, самолетов и промышленных установок.

Ультразвуковая дефектоскопия отлично подходит для обнаружения трещин в сварных швах. Метод основан на использовании высокочастотных звуковых волн, которые способны проникнуть глубоко внутрь материала и отразиться от границ раздела различных плотностей, включая границы трещин. Специальный датчик посылает ультразвуковые волны в направлении проверяемого участка сварного шва,

если на пути распространения звука встречается трещина, волна отражается от нее и возвращается назад к датчику. Анализируя изменения в сигнале (амплитуду, фазу, направление), оператор получает информацию о наличии и размере трещины.

Какие трещины можно обнаружить:

– поперечные трещины – перпендикулярные направлению нагрузки, часто являются следствием усталостных процессов;

– продольные трещины – идущие вдоль направления сварного шва, возникают при несоблюдении технологических режимов сварки;

– радиальные трещины – исходящие от центральной части шва наружу;

– тепловые микротрещины – мелкие дефекты, формирующиеся при быстром охлаждении сварного соединения.

Своевременное выявление трещин помогает предотвратить аварии и продлить срок службы конструкций. Ультразвуковая дефектоскопия незаменима там, где визуальный осмотр невозможен либо недостаточен для надежного анализа состояния сварного соединения.

Существует четыре основных этапа процесса:

1. Подготовка поверхности: поверхность изделия очищается от загрязнений и покрывается контактной жидкостью (чаще всего маслом или гелем) для улучшения передачи ультразвуковых волн.

2. Генерация сигнала: дефектоскоп излучает ультразвуковые колебания определенной частоты.

3. Регистрация эхосигнала: улавливание отраженных сигналов и преобразование их в электрические сигналы.

4. Анализ результатов: оценка амплитуды и формы полученных сигналов позволяет сделать выводы о наличии и характере дефектов.

Преимущество ультразвуковой дефектоскопии заключается в том, что это высокая чувствительность к внутренним дефектам, так же есть возможность исследования толстых конструкций и сложных форм деталей, безопасность для оператора и окружающей среды, быстрота и точность диагностики.

Метод широко используется в промышленности, строительстве, авиации, машиностроении и энергетике для проверки качества сварных швов, трубопроводов, корпусов судов, мостов и других объектов. Таким образом, ультразвуковая дефектоскопия является важным инструментом обеспечения надежности и безопасности конструкций путем выявления скрытых дефектов.

Современные требования рынка требуют высокого уровня точности диагностики дефектов и минимальной зависимости результатов измерений от квалификации оператора. Для достижения поставленных

целей применяются автоматизированные системы и роботизированные комплексы.

Однако традиционные подходы имеют ряд недостатков: высокое влияние человеческого фактора, необходимость ручного перемещения датчиков, невысокая производительность.

Для устранения указанных проблем используются механизмы автоматизации и компьютерные программы анализа сигнала. Это позволяет существенно повысить эффективность контроля, снизить трудоемкость работ и обеспечить высокое качество диагностики [2]. Одним из наиболее перспективных направлений развития является применение мобильных роботов и автоматических линий проверки листов большого формата.

Роботизированные системы контроля – это когда автоматизированные линии оснащаются передвижными тележками, закрепленными датчиками и системой управления перемещением. Подобные установки позволяют контролировать поверхность металлического листа без участия оператора непосредственно на этапе производства.

Наиболее эффективными являются автоматизированные сканеры, способные проводить детальное обследование всего объема проверяемого изделия. Роботы способны анализировать сигналы в режиме реального времени, определяя точное местоположение дефектов, их размеры и характеристики [3]. Особое внимание уделяется внедрению самообучающихся алгоритмов обработки ультразвуковых изображений. Современные программы позволяют выявлять аномалии даже при наличии шумов и помех.

Применение роботизированных комплексов значительно повышает скорость прохождения контроля, снижает количество брака и улучшает общий уровень технологической дисциплины на предприятии.

Одной из тенденций развития механических систем ультразвукового контроля является интеграция интеллектуальных модулей анализа. Например, использование искусственных нейронных сетей и машинного обучения помогает сократить затраты на обучение операторов и минимизировать число ошибок, возникающих вследствие недостаточной подготовки персонала [4 – 7].

Кроме того, внедряются беспроводные датчики и мобильные устройства передачи данных. Они облегчают эксплуатацию оборудования и снижают эксплуатационные расходы.

Еще одной важной задачей являются повышение чувствительности аппаратуры и разработка новых типов преобразователей, способных обнаруживать микродефекты, невидимые традиционными методами.

Механизация и автоматизация процессов ультразвукового контроля металлиста способствует повышению производительности труда, снижению количества бракованной продукции и улучшению общих экономических показателей предприятия. Современное оборудование и программное обеспечение обеспечивают высокий уровень надежности и стабильности контроля, сокращая риски возникновения аварийных ситуаций и повышая безопасность конечных продуктов.

Список литературы

1. Клейнер, Г. Б. Ультразвуковой контроль сварных соединений и листового проката / Г. Б. Клейнер, Б. М. Минц // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2024. – № 10.
2. Федорович, А. В. Автоматизация ультразвукового контроля металлов / А. В. Федорович, Ю. А. Романов // Металлургическое производство и технология литейных цехов. – 2023. – № 8.
3. Яценко, Н. И. Использование мобильных роботов в системах ультразвукового контроля / Н. И. Яценко, Д. С. Половцев // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 12.
4. Романцов, А. А. Цифровая радиография радиационного контроля в современных тенденциях развития цифровых систем [Электронный ресурс] / А. А. Романцов, С. В. Лавырев // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – Вып. XV. – С. 35 – 38.
5. Романцов, А. А. Инженер по радиационному контролю от А до Я: Программы подготовки и уровни квалификации / А. А. Романцов, В. В. Айдаров, М. В. Соколов // Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании–ППРП-2025 : материалы XX Всерос. науч.-практ. конф. Донецкий национальный технический университет. – 21–22 мая 2025 г.
6. Романцов, А. А. Цифровой радиационный контроль: революция в контроле качества сварных швов / А. А. Романцов, М. В. Соколов // Тинчуринские чтения – 2025 «Энергетика и цифровая трансформация» : метериалы Междунар. молодеж. науч. конф. – 23 – 25.04 2025 г.
7. Lavyrev, S. V. Ultrasonic and radiographic testing of welded joints in modern flaw detection / S. V. Lavyrev, A. A. Romantsov, A. V. Vostrikov // The world of science without borders. Tambov state technical university. 26 april 2024 year. – Tambov, 2024. – P. 238 – 241.

Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ»