

УДК 621

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ДЕФЕКТОВ В СТАЛЯХ И ПРОДУКЦИИ МЕХАНООБРАБОТКИ**

А.В. Давыдова, студентка гр. ТСа-251, I курс

Научный руководитель: Короткова Л.П., к.т.н., доцент

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Современное машиностроение и химическая промышленность предъявляют повышенные требования к качеству металлических изделий, в особенности к сталям конструкционного и легированного классов, из которых изготавливаются ответственные узлы оборудования, работающие в условиях высоких нагрузок, агрессивных сред и циклических температурных воздействий. Надежность оборудования напрямую зависит от наличия или отсутствия дефектов, возникающих на различных этапах жизненного цикла изделия — от стадий выплавки и обработки давлением до финишной механообработки. При этом в условиях серийного производства применение разрушающих методов контроля экономически нецелесообразно и часто невозможно без повреждения готового продукта, что обуславливает широкое внедрение методов неразрушающего контроля (НК). Ключевой задачей становится не просто применение того или иного метода, а выбор наиболее эффективного способа диагностики с учетом комплекса факторов: типа материала, геометрии изделия, характера и локализации предполагаемых дефектов, а также требуемой чувствительности и достоверности результатов.

В промышленности наибольшее распространение получили несколько групп сталей, каждая из которых характеризуется специфическим набором типичных дефектов. Углеродистые конструкционные стали (Ст3, Ст20), широко используемые для изготовления корпусных деталей, трубопроводов и элементов крепежа, склонны к образованию пористости и неметаллических включений, формирующихся еще на этапе выплавки и разливки. Низколегированные стали (09Г2С, 10ХСНД), применяемые в сварных металлоконструкциях и сосудах давления, требуют особого внимания ввиду возможных расслоений проката, которые при эксплуатации могут служить концентраторами напряжений. Легированные конструкционные стали (40Х, 30ХГСА), используемые для высоконагруженных деталей, чувствительны к образованию закалочных трещин в процессе термической обработки, а также к развитию усталостных повреждений. Коррозионностойкие аустенитные стали (12Х18Н10Т), незаменимые в химическом и нефтегазовом оборудовании, требуют контроля на наличие межкристаллитной коррозии и микротрещин, возникающих как при сварке,

так и в процессе длительной эксплуатации в агрессивных средах. Дополнительно в продукции механообработки (валы, шестерни, фланцы, корпусные детали) появляются такие дефекты, как надрезы, задиры, прижоги и микротрещины, обусловленные нарушением режимов резания, а также остаточные напряжения, которые могут привести к деформациям при последующей эксплуатации.

Для решения спектра задач в промышленности применяется комплекс методов неразрушающего контроля, каждый из которых имеет свои физические основы, области применения и ограничения. Визуально-измерительный контроль (ВИК) остается первичным и обязательным этапом, позволяющим оперативно выявлять макроскопические дефекты поверхности и отклонения геометрии, однако его чувствительность (порядка 0,1–0,5 мм по раскрытию дефекта) недостаточна для обнаружения опасных микротрещин, особенно в условиях серийного производства, где требуются более высокие показатели достоверности. Ультразвуковой контроль (УЗК) за счет способности волн проникать на значительную глубину (до 1000 мм и более) и отражаться от границ раздела сред занимает лидирующие позиции при диагностике внутренних дефектов в поковках, прокате и массивных деталях.

Магнитопорошковый метод (МПК) является высокочувствительным (порог выявления трещин с раскрытием до 0,01 мм) и производительным способом контроля поверхности и подповерхностных слоев (глубиной до 2–3 мм) для ферромагнитных сталей. Наибольшую эффективность МПК демонстрирует при контроле стали 40Х, для которой характерны закалочные трещины, имеющие незначительное раскрытие и требующие высокой чувствительности. Однако данный метод принципиально неприменим для аустенитных немагнитных сталей, а также для выявления внутренних дефектов, расположенных на глубине более нескольких миллиметров. Капиллярный контроль (ПВК), в свою очередь, универсален по материалу и обладает самой высокой чувствительностью к поверхностным нарушениям сплошности (раскрытие до 0,001 мм), что делает его незаменимым для аустенитных сталей (12Х18Н10Т), где межкристаллитная коррозия проявляется в виде сети мельчайших трещин, а также для финишного контроля ответственных поверхностей после механообработки. Его главным ограничением остается невозможность выявления подповерхностных и внутренних дефектов, что в ряде случаев требует дублирования другими методами. Радиографический контроль (РК), основанный на различной степени ослабления ионизирующего излучения, традиционно применяется для сварных соединений, литых изделий и деталей сложной формы, где ультразвуковой доступ затруднен. Современная цифровая радиография позволяет снизить время экспозиции, повысить чувствительность до 0,2–0,5 мм и обеспечить архивирование результатов в электронном виде, однако метод остается трудоемким, требует соблюдения строгих мер радиационной безопасности и, подобно УЗК, ориентирован преимущественно на внутренние дефекты.

Для количественной оценки эффективности перечисленных методов был проведен анализ выявляемости дефектов на условной выборке из 120 изделий, включающей детали из сталей 20, 09Г2С и 40Х, типичных для продукции механообработки. В ходе анализа учитывались три категории дефектов: поверхностные (трещины, задиры, поры), подповерхностные (дефекты, расположенные на глубине до 3 мм) и внутренние (расслоения, внутренние трещины, включения на глубине более 3 мм). Полученные результаты, представленные в таблице, наглядно демонстрируют специализацию методов: визуальный контроль выявляет лишь 65% поверхностных дефектов и полностью неэффективен для подповерхностных и внутренних. Магнитопорошковый и капиллярный методы показывают высокие результаты на поверхности (95% и 98% соответственно), причем МПК дополнительно способен обнаружить 70% подповерхностных дефектов за счет намагничивающего поля, что выгодно отличает его от капиллярного. Ультразвуковой и радиографический методы, напротив, демонстрируют низкую чувствительность к поверхностным дефектам (40% и 35% соответственно), но обеспечивают высокую выявляемость внутренних несплошностей (92% и 96%). Примечательно, что радиография дает несколько более высокий процент обнаружения внутренних дефектов, что связано с возможностью получения объективного изображения и меньшей зависимостью от геометрии объекта, однако УЗК превосходит ее в оперативности и при контроле толстостенных конструкций.

Анализ результатов позволяет сделать ряд обоснованных выводов о выборе приоритетных методов в зависимости от контролируемого материала. Для стали 40Х, склонной к образованию закалочных и шлифовочных трещин при термической и механической обработке, критическое значение имеет применение магнитопорошкового контроля, обеспечивающего максимальную вероятность выявления опасных поверхностных дефектов. Дополнительное применение УЗК или РК необходимо лишь при наличии требований к контролю внутренней структуры (например, для поковок). Для стали 09Г2С, в которой наиболее вероятны расслоения проката, предпочтительным является ультразвуковой контроль с применением специализированных методик (например, совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем с высокой разрешающей способностью по глубине), поскольку ни МПК, ни ПВК не способны обнаружить такие дефекты. Для аустенитной стали 12Х18Н10Т, используемой в средах, вызывающих межкристаллитную коррозию, единственно эффективным методом контроля поверхности становится капиллярный контроль, а для контроля сварных соединений и зон термического влияния часто применяют радиографию в комбинации с цветной дефектоскопией.

В результате установлено, что эффективность методов неразрушающего контроля не является абсолютной величиной, а существенно зависит от типа дефектов, характеристик материала, особенностей технологии изготовления и условий эксплуатации. Рациональное проектирование схем контроля, учитывающее сильные и слабые стороны каждого метода, позволяет обеспечить вы-

сокий уровень достоверности диагностики при оптимальных временных и экономических затратах. Перспективным направлением развития является дальнейшее внедрение цифровых технологий (цифровая радиография, автоматизированный ультразвуковой контроль с фазированными решетками, компьютерное моделирование процессов намагничивания), которые не только повышают чувствительность и надежность, но и обеспечивают объективное документирование результатов, что особенно важно в условиях цифровизации производственных процессов и требований нормативной документации.

**Список литературы:**

1. ГОСТ 14782–86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
2. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
3. Шестопалов В.П. Неразрушающий контроль металлов.