

ческого контакта должно быть таким, чтобы максимум удерживающей силы достигалась в центре звукопровода, градиент магнитного поля был приблизительно постоянный в зоне удержания и направлен к излучающей поверхности. Были разработаны две магнитные системы: 1) это система с одним магнитом с магнитным моментом, параллельным поверхности ввода для магнитных материалов; 2) для немагнитных материалами эффективными оказались системы с двумя магнитами с магнитными моментами нормальными к поверхности изделия и противоположны друг другу. Разработанные конструкции позволили автоматизировать процесс контроля ответственных деталей авиационной техники и исключить субъективный фактор из оценки результатов контроля.

УДК 620.179.16

## **ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ЗАКАЛЕННЫХ СЛОЕВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

А.Р. Баев, д-р техн. наук, проф., А.Л. Майоров, канд. техн. наук, В.В.Парадинец  
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поверхностная закалка является прогрессивным методом обработки деталей. Это закалка ТВЧ, закалка после цементации, различные методы химико – термической обработки, наплавка, напыление и т.д. Важным преимуществом данных методов является то, что сердцевина детали остаётся достаточно пластичной, поверхность приобретает высокую твёрдость и существенную износостойкость. Однако, технологический процесс закалки сложен и существует множество факторов влияющих на конечный результат. Характер протекания фазовых превращений и, как следствие, получаемая структура и глубина упрочнения определяются температурно–временным воздействием нагрева на поверхностный слой материала. Одними из наиболее часто встречающихся дефектов поверхностной закалки являются недостаточная глубина слоя, неравномерность глубины закаленного слоя и наличие мест, в которых поверхностная закалка не произошла. Все указанные дефекты могут привести к фатальным последствиям для детали или механизма в целом. Попытки использования неразрушающих методов контроля основаны, как правило, на магнитных и электромагнитных измерениях. Однако на практике они могут давать значительные погрешности, связанные с многофакторностью получаемых результатов которые зависят не только от толщины закаленного слоя, но и от твердости, предела текучести, предела прочности, температуры отпуска, химического состава, ударной вязкости, деформационного состояния и др. Кроме того, следует учитывать, что при сложной форме поверхности (зубчатое колесо, галтель и т.д.) затруднителен не только сам процесс закалки, но и проведение магнитных измерений.

Улучшение структуры в закаленном слое приводит к существенному уменьшению затухания, особенно для длин волн ультразвука, близких к величине зерна. По имеющимся данным изменение затухания может составлять до 400%. Но при этом сам процесс измерения затухания достаточно сложен и имеет большие погрешности. Поэтому, в качестве базового параметра была выбрана скорость распространения упругих колебаний. Были проведены соответствующие экспериментальные исследования, которые показали зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от степени закалки. В результате исследований было установлено, что уменьшение скорости для продольных волн составляет (2,2–2,5)%, для поперечных (2,9–3,2)%. Такой диапазон получен в результате статистической обработки результатов измерений для широкого набора образцов с разной толщиной закаленного слоя и из разных видов стали. Кроме того, следует учитывать, что образцы имеют разную толщину и структуру переходного слоя от закаленной к незакаленной областям, которая определяется технологией закалки. А за счет изменения скорости изменяется и угол преобразования продольной волны в поперечную  $\beta$ , при проведении измерений наклонными преобразователями. Указанные данные хорошо совпадают с результатами других авторов, полученными для валков холодной прокатки, закаленных токами промышленной частоты. При этом следует учитывать, что при закалке токами промышленной частоты получается протяженная переходная зона, в которой происходит рефракция ультразвуковой волны. Поэтому следует ориентироваться на максимальные изменения скорости, полученные при экспериментах.

Таким образом, для того, чтобы оценить глубину закалки необходимо выбрать схему прозвучивания объекта таким образом, чтобы максимум акустической энергии концентрировался в исследуемой области, и оценить изменение скорости звука при различной глубине закаленного слоя. При этом следует учитывать, что изменение скорости продольной волны даже на 3%, например, при расстоянии между преобразователями  $\sim 5 \cdot 10^{-2}$  м, предполагает точность измерения временного интервала не хуже  $2,5 \cdot 10^{-7}$  с. Это очень высокая точность для акустических измерений.

Для реализации предложенного способа был разработан индикатор глубины упрочненных слоев. Индикатор включает в себя акустический блок, к которому подключен измерительный преобразователь и блок АЦП, с выхода которого данные поступают на персональный компьютер. Разработано специальное программное обеспечение, которое выполняет обработку принятых сигналов, измерение времени распространения волны и определение толщины упрочненного слоя в соответствии с заложенной в память градуировочной кривой. Контроль индикатором достаточно прост. При этом, результаты измерений не зависят от марки стали. Предусмотрена только предварительная калибровка по «сырому» образцу. Полученная точность измерений не менее 20 % в диапазоне толщин (0,5–1,5) мм и порядка 10 % в области более толстых слоев.