

Д.О. ДАШИН, студ., ДонНТУ,

В.П. ТАРАСЮК, к-т. техн. наук, доц., ДонНТУ

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕР ПОКРЫТИЙ РАБОЧИХ ВАЛКОВ НА ПРОКАТНЫХ СТАНАХ

В данной работе разработана структура и изучены возможности ультразвукового толщиномера, который специализируется на измерении толщины поверхностного покрытия рабочих валков на прокатных станах. Осуществлён выбор и расчёт раздельно-совмещённого пьезоэлектрического ультразвукового преобразователя применяемого в качестве излучателя и приёмника акустических сигналов.

In this work the structure and studied the possibility of an ultrasonic thickness gauge, which specializes in measuring the thickness of the surface coating of work rolls in rolling mills. Carried out the selection and calculation of separate-combined piezoelectric transducer used as a transmitter and receiver of acoustic signals.

Введение. На сегодняшний день рабочие валки, являясь инструментом, от которого зависит производительность прокатного стана, оказывают большое влияние на качество поверхности и профиль проката. Валки в процессе работы изнашиваются, на их поверхности появляются микродефекты, она постепенно стирается. Развиваясь, дефекты могут приводить к сколам или к полному разрушению валка.

В условиях холодной прокатки металлов (трение со скольжением) многочисленные переменные факторы внешнего воздействия сильно влияют на рабочую поверхность валков – давление металла на валки, скорость прокатки, коэффициент трения скольжения, температурный режим валков, условия смазки полосы и охлаждения валков, условия натяжения полосы при прокатке и так далее [1]. Аварийный выход валков из строя приводит к очень большим затратам (простой стана на многие часы, бракованный прокат, повреждение оборудования). Стоимость высокохромистых валков составляет 30 - 40, а быстрорежущих - 40 - 70 тыс. долларов.

Проблема быстрого износа рабочих валков вызвала необходимость контроля прочности их поверхностного слоя в связи с тем, что они испытывают термический удар и большие знакопеременные нагрузки в процессе проката.

Анализ разработок по теме. На сегодняшний момент ведутся активные разработки в области толщинометрии (магнитной, радиационной, ультразвуковой, оптической). Этим вопросом занимаются как отечественные, так и зарубежные компании и фирмы. Среди них можно выделить: фирму «Акустические Контрольные Системы» (Москва, Россия), которая занимается проведением научных исследований и разработкой толщиномеров и дефектоскопов; предприятие «Фирма С-Комп» (Никополь,

Украина), которая занимается производственно-торговой деятельностью и выпускает приборы и преобразователи для неразрушающего контроля; компанию «Тек Инжиниринг» (Киев, Украина), выпускающая производственное и лабораторное оборудование; научно-промышленную компанию «Луч» (Балашиха, Россия). Основным недостатком толщиномеров, которые выпускаются данными фирмами, является недостаточная точность из-за большого диапазона измерения приборов.

Постановка задачи исследования. Целью данной статьи является разработка структуры и изучение возможностей ультразвукового толщиномера для использования в измерениях толщины поверхностного покрытия рабочих валков на прокатных станах с большей точностью, надёжностью, в более тяжёлых условиях, чем многие его аналоги.

Решение задачи и результаты исследования. Первоначально для увеличения прочности верхнего слоя рабочих валков производилось поверхностное упрочнение с применением различных технологий. Однако с увеличением скорости прокатки, ужесточением норм по качеству поверхности проката такие валки перестали удовлетворять все возрастающим требованиям. Для изготовления высококачественных рабочих валков стали применять двухслойное литье. Внутреннее ядро бочки отливается из чугуна (серого или шаровидного), а рабочий слой - из легированных или высоколегированных (хромистых) сталей. В последние годы в качестве металла для внешнего слоя начали применять полу- и даже быстрорежущие стали [2].

В толщиномере предлагается использовать метод ультразвуковой эхолокации. Принцип работы толщиномера изображён на рис. 1. Раздельно-совмещённый пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь применяется в качестве излучателя и приёмника акустических сигналов.

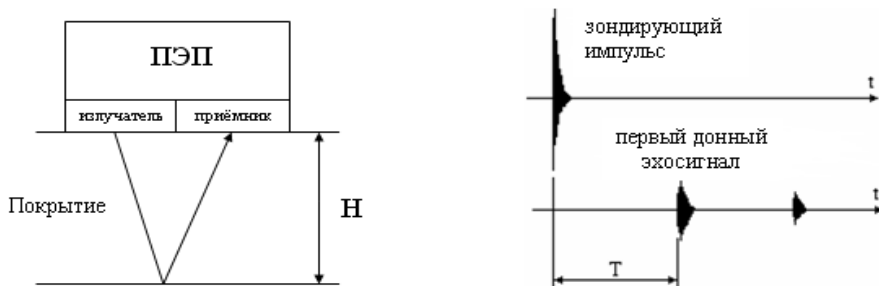


Рис. 1. Принцип работы ультразвукового толщиномера

Ультразвуковой преобразователь устанавливается на поверхности изделия. Поверхность под ним смазывается контактной жидкостью для обеспечения акустического контакта. Ультразвуковой толщиномер формирует мощный короткий электрический сигнал, который поступает на излучающую пьезопластину, которая возбуждает акустический

зондирующий импульс. Этот импульс распространяется вглубь покрытия, отражается от границы соприкосновения покрытия с валком и возвращается обратно к преобразователю. Приёмная пьезопластина датчика преобразует отражённый акустический импульс в электрические колебания (донный эхосигнал). Донный эхосигнал поступает в толщиномер, усиливается приёмником до амплитуды необходимой для обнаружения сигнала.

Измерение задержки донного эхосигнала осуществляется методом перехода через ноль. Прибор снабжён пороговым дискриминатором для обнаружения эхосигнала. Метод перехода через ноль изображён на рис. 2. Если эхосигнал превышает порог дискриминатора, то прибор начинает ждать перехода сигнала через ноль. В этот момент фиксируется задержка эхосигнала необходимая для прохождения эхосигнала через покрытие и назад [3]. Достоинство такого метода: обеспечивается высокая стабильность показаний толщиномера, так как момент перехода сигнала через ноль не зависит от амплитуды сигнала .

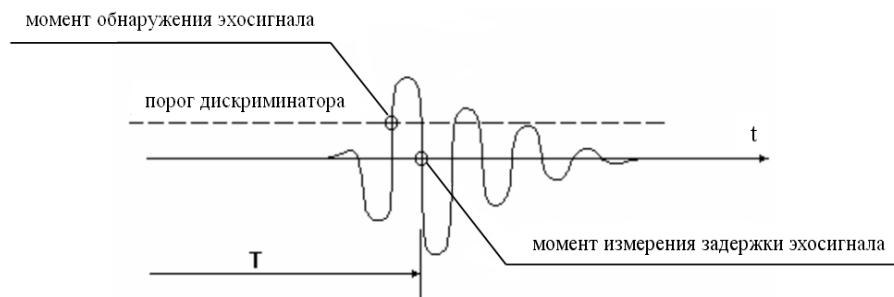


Рис. 2. Определение задержки эхосигнала методом перехода через ноль

Прибор измеряет время задержки первого донного эхосигнала относительно момента излучения зондирующего импульса. Обозначим это время – T . В измеряемое время T входит определённое время пробега волн в самом преобразователе – T_p . Следовательно, время, характеризующее толщину изделия, определяется выражением $(T - T_p)$. Путь пробега волн в изделии равен произведению скорости продольных волн на время – $C \cdot (T - T_p)$. Учитывая, что волны пробегают толщину изделия два раза, получим

$$H = C \frac{T - T_p}{2}. \quad (1)$$

Вышеуказанная формула является приближённой поскольку на самом деле ультразвуковые волны имеют V – образный путь в покрытии и длина такого пути всегда больше, чем удвоенная толщина изделия. Именно ошибка измерения толщины, связанная с приближённым расчётом, является основной погрешностью толщиномера. Она зависит от размера пьезоэлементов, длины волны и от формы ультразвукового пучка. Основная

погрешность представляет собой систематическую ошибку, которую можно исключить.

В толщиномере используется раздельно-совмещенный преобразователь типа П112-5-10/2-А-003-М, диапазон измерения которого от 1 до 300 мм. Данный преобразователь является прямым преобразователем, осуществляющим ввод и прием УЗ колебаний по нормали к поверхности в точке ввода. По способу осуществления акустического контакта преобразователь относится к контактным преобразователям, таким, рабочая поверхность которых при работе соприкасается с поверхностью объекта контроля или имеет расстояние до нее меньше половины длины волны в контактной жидкости. В преобразователе в одном корпусе размещены два пьезоэлемента на соответствующих акустических линиях задержки (призмах); один из них работает в режиме излучения, другой – в режиме приема упругих колебаний. Рабочая поверхность преобразователя имеет диаметр 10мм. Габаритные размеры преобразователя – 18 x 50 мм. В качестве материала линий задержки в ультразвуковых преобразователях раздельно - совмещенного типа П112 используется полиимид, композитные материалы, оргстекло, кварцевое стекло, что обеспечивает повышенную износоустойчивость преобразователей и возможность работы на изделиях с Rz до 200 мкм. Излучающая поверхность преобразователя плоская, круглой формы.

Измерение толщины покрытия пьезопреобразователем в режиме излучения сводится к нахождению распределения механических напряжений (деформаций) на его поверхности, обращенной к изделию, либо на поверхности изделия, примыкающей к преобразователю, при известном электрическом напряжении (силе тока), приложенном к преобразователю. В режиме приёма решается обратная задача – нахождение электрического отклика преобразователя, присоединённого к электрическому регистрирующему устройству, при создании на его поверхности известного распределения механических напряжений (деформаций). Система уравнений, описывающая работу пьезопреобразователя, должна содержать уравнение движения упругой среды, уравнения, связывающие механические напряжения и деформации, а также уравнения, учитывающие прямое и обратное взаимодействия электрических и акустических полей при излучении и приёме УЗ сигналов [4].

Уравнение движения упругой среды можно получить из 2-го закона Ньютона, если приравнять силу внутренних напряжений произведению ускорения на массу единицы объёма [5]:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (2)$$

где ρ - плотность упругой среды; ξ_i - механическое смещение в упругой волне.

Если в качестве независимых переменных использовать деформацию тела и напряжённость электрического поля, то при подстановке в уравнение (2) уравнения прямого пьезоэффекта пренебрегая тепловыми эффектами получаем

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} - c_{ijkl}^E \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial x_j \partial x_k} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (e_{ijk} E_k), \quad (3)$$

где c_{ijkl}^E - коэффициенты упругости; e_{ijk} - пьезоконстанты.

Если продифференцировать левую и правую части уравнения (2) по координате и в получившееся выражение вместо u_{ik} подставить уравнение обратного пьезоэффекта, то получим

$$\rho s_{ijkl}^E \frac{\partial^2 \sigma_{kl}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \sigma_{ik}}{\partial x_k \partial x_j} = \rho d_{ijk} \frac{\partial^2 E_k}{\partial t^2}, \quad (4)$$

где s_{ijkl}^E - податливости; d_{ijk} - пьезомодули.

Уравнения (3) и (4) позволяют выразить изменяющиеся во времени и пространстве механические величины (смещение, механические напряжения) через электрические (напряжённость и индукция электрического поля), и наоборот. Однако эти уравнения должны быть дополнены уравнениями, связывающими напряжённость и индукцию электрического поля внутри пьезоэлектрика с такими величинами, как напряжение, приложенное к пьезопреобразователю, или сила тока, вырабатываемого генератором электрических сигналов.

Электрическое поле E_i в пьезоэлектрике является потенциальным и может быть охарактеризовано с помощью скалярного потенциала φ . Используя вместо E_i одно из уравнений прямого пьезоэффекта и выполняя интегрирование, получаем

$$\int_0^d E_i dx_i = \varphi_n = \int_0^d \beta_{ij}^u D_j dx_i - \int_0^d h_{ijk} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} dx_1, \quad (5)$$

где d - толщина пьезоэлемента; φ_n - разность потенциалов между металлическими электродами, расположенными на противоположных гранях пьезоэлемента; D_j - электрическая индукция; h_{ijk} - пьезоконстанты.

Что касается силы тока, протекающего через пьезоэлемент, то её нетрудно связать с электрической индукцией, так как последняя непосредственно определяется поверхностной плотностью свободных зарядов на проводящих электродах:

$$i = A \frac{\partial \sigma_{свб}}{\partial t} = A \frac{\partial D_n}{\partial t}, \quad (6)$$

где A - площадь электрода; D_n - составляющая вектора электрической индукции, нормальная к поверхности электродов. Подчёркнём, что вне электродов, внутри пьезоэлектрика, являющегося диэлектриком, выполняется уравнение [6]:

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0. \quad (7)$$

В результате получаем систему уравнений – одно из уравнений (3) или (4), уравнения (5), (6) и (7). Если упростить данную систему, то мы получим одномерное неоднородное волновое уравнение

$$c_{33}^E \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x_3^2} - \rho \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x_3} (e_{33} E_3), \quad (8)$$

из которого следует, что при приложении внешнего поля вдоль оси x_3 в пьезоэлементе возбуждается чисто продольная волна, распространяющаяся в том же направлении x_3 . На данном принципе работает выбранный раздельно-совмещенный преобразователь типа П112-5-10/2-А-003-М.

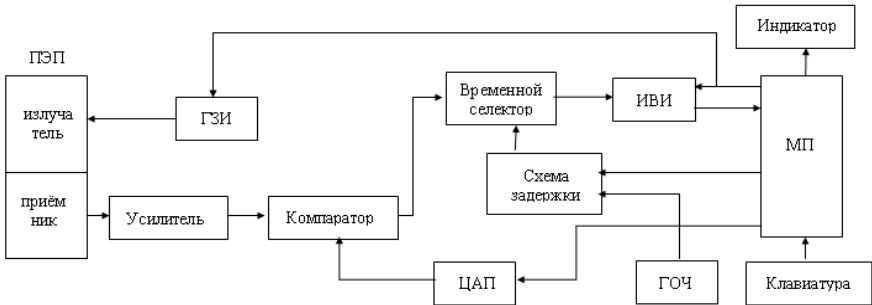


Рис. 3. Структурная схема ультразвукового толщиномера для измерения толщины поверхностного покрытия валков прокатных станов

Рассмотрим структурную схему прибора (см. рис. 3). Центральным звеном прибора является микропроцессор, на который возложены большинство функций управления другими устройствами и проведение вычислений. Режим работы микропроцессора задаётся оператором с кнопочной клавиатуры. Состояние микропроцессора, результаты вычислений выводятся на индикатор.

Микропроцессор даёт команду на формирование запускающего импульса в генератор зондирующих импульсов (ГЗИ) и одновременно запускается измеритель временных интервалов (ИВИ). ГЗИ в свою очередь формирует зондирующий импульс, который поступает на излучающую пьезопластину первичного измерительного преобразователя. Донный

эхосигнал от приёмного пьезоэлемента поступает на вход усилителя. Принятый измерительным преобразователем эхо-импульс усиливается, и после амплитудной и временной селекции нормализованный эхо-импульс поступает на измеритель временных интервалов.

Амплитудная селекция и формирование нормализованного импульса, «привязанного» к характерной точке принятого сигнала, осуществляется с помощью компаратора и ЦАП, управляемого микропроцессором. Временная селекция эхо-импульса выполняется на временном селекторе с использованием схемы задержки, управляемой также от микропроцессора. Закон управления схемой задержки и ЦАП определяется микропроцессором в соответствии с введенными с панели управления параметрами ВРЧ (временная регулировка чувствительности) – максимальное значение и скорость спада уровня амплитудного ограничения. Измерение временных интервалов и формирование управляемой задержки осуществляется с помощью генератора опорной частоты (ГОЧ). Измеренный в ИВИ временной интервал считывается микропроцессором для выполнения обработки результатов измерения и формирования выходной информации.

Значение скорости распространения продольных волн в материале контролируемого изделия, необходимое для вычисления толщины, либо устанавливается вручную, либо измеряется по значению известной толщины. Настройка толщиномера на используемый преобразователь производится на эталоне с известной скоростью распространения УЗК и известной толщиной. При этом в микропроцессоре сохраняются данные о задержках в призме преобразователя. Электропитание толщиномера осуществляется от встроенных элементов питания (батареи, аккумуляторы), обеспечивающих его автономную работу.

Вывод. Предложенный в данной статье ультразвуковой толщиномер может быть адаптирован для измерения различных толщин покрытий рабочих валков разного материала на прокатных станах. В толщиномере используется метод ультразвуковой эхолокации. Прибор использует пьезоэлектрический преобразователь раздельно-совмещённого типа. Благодаря измерению задержки донного эхосигнала методом перехода через ноль обеспечивается высокая стабильность показаний толщиномера. Основная погрешность толщиномера представляет собой систематическую ошибку, которую можно исключить. Центральным звеном прибора является микропроцессор, на который возложены практически все функции управления другими устройствами.

Список литературы: 1. Валки прокатных станов / Под ред. *В.П.Полухина*. – М.: Машиностроение, 1989. – 451 с. 2. *А.Ф.Белов*. Прокатное и волочильное производство. – М.: Машиностроение, 1990. – 515 с. 3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. *В.В.Клюева*. Т. 3: Ультразвуковой контроль / *И.Н.Ермолов, Ю.В.Ланге*. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 4. *И.Н.Ермолов*. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля. – М.: Машиностроение, 1986. – 274 с. 5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 624 с. 6. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966. – 620 с.