

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.386.12; 539.16.04
DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-3-10

ОБ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ТОЛЩИНЫ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ИЗ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА НА СТАЛЬНУЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ *

А. Л. Углов, доктор технических наук, Научно-исследовательский центр контроля и диагностики, Нижний Новгород, Россия

А. А. Хлыбов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

М. В. Колесников, кандидат технических наук, Научно-исследовательский машиностроительный институт имени В.В. Бахирева, Москва, Россия

Т. В. Быстрякова, Научно-исследовательский машиностроительный институт имени В. В. Бахирева, Москва, Россия

А. Л. Бычков, Научно-исследовательский машиностроительный институт имени В. В. Бахирева, Москва, Россия

Известно, что для улучшения эксплуатационных характеристик металлических изделий широко применяются наплавки, в частности плазменные. В работе исследовалась плазменная наплавка из медно-никелевого сплава, нанесенная на стальную цилиндрическую поверхность. К наплавкам предъявляются повышенные требования: стабильность толщины покрытия, отсутствие макроскопических дефектов в виде трещин и непроваров как в толще наплавки, так и в зоне сплавления.

Учитывая, что акустические свойства медно-никелевой наплавки и основного металла близки по своим характеристикам, обеспечить контроль качества наплавки существующими методиками (на базе акустических методов) достаточно сложно, особенно в условиях массового производства. В связи с этим возникает необходимость дальнейшего развития существующих методов и методик контроля толщины наплавки, акустические свойства которых близки к свойствам основного металла.

Для решения данной проблемы были проведены исследования, которые показали, что можно использовать наклонный преобразователь поперечных волн с углом ввода, обеспечивающим контроль заданной толщины покрытия с погрешностью 0,02 мм. Экспериментальные данные, полученные акустическим методом, подтверждены результатами химического травления. Также по результатам этих исследований предложен автоматический контроль толщины покрытия с выводом результатов контроля в базу данных и на экран монитора.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, наплавка, толщина покрытия, акустический импеданс.

Введение

Во многих конструкциях машин широко используются металлические детали цилиндрической формы с нанесенной на поверхность наплавкой из металла, отличного от основного. Одним из эффективных и при этом универсальных современных способов наплавки в настоящее время признается наплавка плазменной дугой. В ряде случаев к наплавкам предъявляются повышенные требования: от-

сутствие макроскопических дефектов в виде трещин и непроваров как в толще наплавки, так и в зоне сплавления. Кроме того, требуется обеспечение стабильности толщины покрытия по всей поверхности детали.

Существующие методики контроля в основном направлены на выявление дефектов в наплавленном слое и на границе сплавления (ПНАЭ Г-7-030–91 «Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабри-

© Углов А. Л., Хлыбов А. А., Колесников М. В., Быстрякова Т. В., Бычков А. Л., 2019

* Исследование выполнено по гранту РФФИ № 19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

катов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов, атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Ч. II. Контроль сварных соединений и наплавки; ПНАЭ Г-7-010–89 «Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля»). Анализ литературы показывает, что толщину тонких покрытий обычно контролируют с использованием средств электромагнитного (вихретокового) и магнитного методов неразрушающего контроля [1, 2]. Толщина толстых наплавки (более 1 мм) в силу особенностей этих методов практически не контролируется. В отличие от упомянутых методов акустический метод толщинометрии [3, 4], в том числе и толщинометрии наплавки [5, 6], базируясь на развитых к настоящему времени приемах возбуждений упругих волн различных типов [7, 8], разработанных современных аппаратно-программных средствах [9] и оптимальных алгоритмах обработки информации [10, 11], имеет более универсальный характер.

Для контроля толстых наплавки одним из основных методов является акустический, базирующийся на современных подходах к оценке закономерностей распространения упругих волн различных типов в биметаллических материалах.

К сожалению, в настоящее время, несмотря на развитые средства автоматизации ультразвукового контроля, 95 % объема контроля сварных соединений и наплавки различного типа проводится вручную.

Технология плазменной наплавки обеспечивает очень высокий уровень сцепления основного и наплавляемого металлов практически без переходного слоя, что усложняет традиционный контроль толщины наплавки с использованием обычных прямых совмещенных контактных преобразователей упругих продольных волн. Задача особенно усложняется в случае, когда акустические свойства наплавки и основного металла близки по своим характеристикам.

Цель настоящего исследования – разработка автоматизированной методики ультразвукового контроля толщины толстых наплавки на цилиндрические детали в случае, когда акустические свойства материалов наплавки и основного металла близки.

Методика контроля толщины наплавки

Возможность ультразвукового контроля толщины наплавки изучалась на деталях в форме полого цилиндра диаметром 150 мм, толщиной 10 мм. Деталь изготовлена из конструкци-

онной легированной стали типа 35ХН3М. Наплавочная проволока – медно-никелевый сплав МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 по ГОСТ 16130–90. Диапазон исследованной толщины наплавки 2...5 мм.

Наплавка осуществлялась на наружную сторону детали в процессе продольно-поперечного перемещения плазматрона в несколько проходов до достижения требуемой толщины.

Для измерения скорости (времени) распространения упругих волн использовался измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» (в Государственном Реестре средств измерений № 67552-17). Для используемых далее расчетов на плоских образцах толщиной 5 мм из стали 35ХН3М и наплавки МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 была измерена скорость распространения упругих волн.

Коэффициенты отражения от границы сталь – наплавка для продольной R_l и поперечной R_t волн вычисляются по следующим формулам:

$$R_l = \frac{Z_l^{ст} - Z_l^M}{Z_l^{ст} + Z_l^M}; \quad (1)$$

$$R_t = \frac{Z_t^{ст} - Z_t^M}{Z_t^{ст} + Z_t^M}, \quad (2)$$

где $Z_l^{ст}$, Z_l^M , $Z_t^{ст}$, Z_t^M – соответствующие импедансы продольных и поперечных волн для каждой из контролируемых сред (стали и медного сплава). Импеданс определяется из соотношения $Z = \rho V$, где ρ – плотность соответствующей среды; $V = V_l$ – скорость продольной, $V = V_t$ – скорость поперечной волны в соответствующей среде.

Используя численные значения для скоростей и плотностей материала, получаем импедансы для продольной и поперечной волн. Подстановка значений импедансов в выражения (1), (2) показывает, что коэффициент отражения для поперечной волны более чем вдвое превышает коэффициент отражения для продольной волны (11 и 4,5 % соответственно).

Полученные оценки наглядно подтверждаются экранными формами, приведенными на рис. 1, а, б. На рисунках приведены результаты измерений с использованием контактных прямых совмещенных преобразователей без линии задержки. Используемые преобразователи обеспечивали ввод упругих волн перпендикулярно поверхности образца. В случае использования поперечных волн в качестве контактной жидкости применяли эпоксидную смолу без отвердителя по ГОСТ 10587–84. Эти данные показыва-

ют, что при значении R_t , превышающем 10 %, вполне может быть обеспечена фиксация и анализ импульсов поперечной волны, отраженных от границы наплавка – сталь.

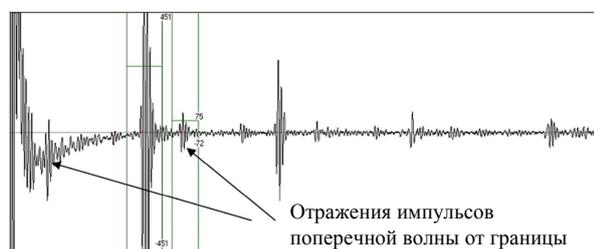
На рис. 1, *a* приведена картина отраженных импульсов продольной волны с номинальной частотой 15 МГц (при более низких частотах отражения от границы наплавка – сталь практически отсутствовали).

На рис. 1, *a* видны отраженные импульсы продольной волны от границы сталь – наплавка, однако их амплитуда слишком мала для проведения надежных измерений.

На рис. 1, *b* приведена картина отраженных импульсов поперечной волны с номинальной частотой 5 МГц.



a



b

Рис. 1. Осциллограмма для прямого совмещенного преобразователя: *a* – продольная волна (частота 15 МГц); *b* – поперечная волна (частота 5 МГц)

Fig. 1. Oscillogram for normal probe: *a* - longitudinal wave (frequency 15 MHz); *b* - shear wave (frequency 5 MHz)

Правильность интерпретации полученной осциллограммы подтверждается следующим. Расстояние до границы отражения (толщина наплавки) рассчитывается по элементарной формуле

$$h_m = \frac{V_t^m t_{1-2}}{2}, \quad (3)$$

где t_{1-2} – время двойного пробега импульса поперечной волны в слое меди (задержка второго отраженного от границы наплавки импульса относительно первого), равное в данном

случае 3290 нс. Из формулы (3) получаем $h_m \approx 3,72$ мм.

Для определения фактической толщины наплавки после проведения ультразвуковых измерений на исследованном образце слой наплавки удаляли путем анодного травления в хромово-аммонийном электролите. Фактическое значение толщины наплавки, измеренное с погрешностью 0,1 мм, оказалось равным 3,7 мм, что свидетельствует о возможности определения толщины исследуемой наплавки с использованием прямого совмещенного преобразователя поперечных волн.

Принципиальным недостатком использования прямого совмещенного преобразователя поперечных волн является высокая трудоемкость и низкая скорость измерений, что связано с необходимостью применения специальных вязких контактных жидкостей (эпоксидная смола, вязкие органические соединения и пр.). При этом скорость контроля по сравнению с контактным или иммерсионным вводом продольной волны падает на порядок из-за необходимости притирки преобразователей поперечных волн, что практически ограничивает возможность обеспечения контроля толщины покрытий в производственных условиях, в том числе и при организации автоматизированного контроля.

Одним из наиболее распространенных способов ввода ультразвука в контролируемую среду является излучение ультразвука через клиновидную линию задержки из оргстекла.

Лучевая картина отражения упругих волн от границы наплавка – сталь в общем случае соответствует рис. 2.

Экспериментальными исследованиями на образцах с наплавкой был определен оптимальный угол ввода ультразвука α_1 , обеспечивающий для исследуемого диапазона толщины наплавки возможность получения максимального акустического сигнала, прошедшего через контролируемую наплавку. Этот угол оказался близким к 60° (что больше первого критического для границы оргстекло – сталь). При угле α_1 , равном 60° , значение γ_1 становится больше 90° , т. е. преломленная продольная волна не образуется, что значительно улучшает соотношение сигнал/шум на получаемых в процессе измерений осциллограммах.

По рис. 2 легко вычислить базу L преобразователя, обеспечивающую возможность контроля наплавки толщиной h :

$$L = 2h \operatorname{tg} \gamma_1. \quad (4)$$

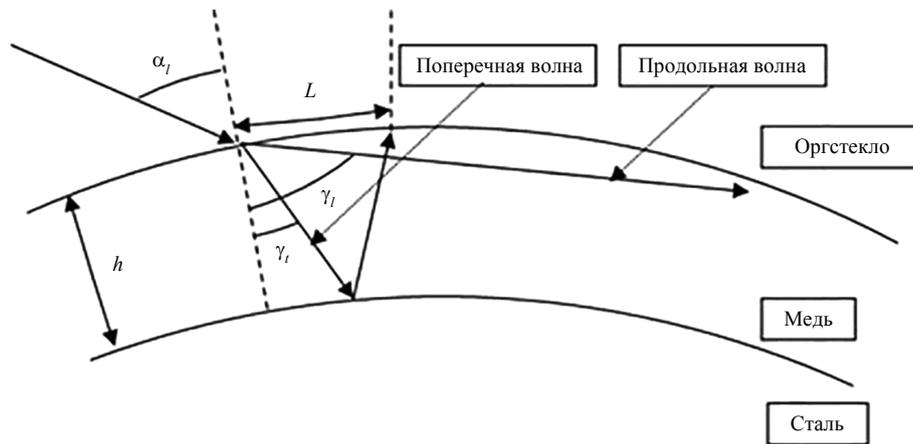


Рис. 2. Лучевая картина преломления: α_i – угол ввода ультразвука; γ_i – угол преломления поперечной волны в меди; γ_l – угол преломления продольной волны в меди; h – толщина слоя меди; L – база преобразователя: расстояние между точкой выхода излучающего первичного преобразователя (по ГОСТ Р ИСО 5577–2009) и аналогичной ей точкой приемного первичного преобразователя, работающего как приемник

Fig. 2. Ray refraction pattern: α_i - angle of ultrasound; γ_i - angle of a shear wave refraction in copper; γ_l - angle of a longitudinal wave refraction in copper; h - the thickness of the copper layer; L - probe base: the distance between the output point of the emitting primary probe (according to GOST R ISO 5577-2009) and a similar point of the receiving primary probe operating as a receiver

Из закона Снеллиуса следует

$$\frac{\sin \alpha_i}{V_i^{\text{орг}}} = \frac{\sin \gamma_i}{V_i^{\text{М}}}, \quad (5)$$

тогда

$$L = 2h \frac{V_i^{\text{М}}}{V_i^{\text{орг}}} \frac{\sin \alpha_i}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_i^{\text{М}}}{V_i^{\text{орг}}} \sin \alpha_i^{\text{орг}} \right)^2}}. \quad (6)$$

Для середины диапазона исследуемой толщины наплавов ($h_{\text{ср}} = 3,5$ мм) получаем $L \approx 4$ мм.

Был сконструирован надежный сканирующий преобразователь, излучатель и приемник которого расположены в одном корпусе по технологии, аналогичной технологии изготовления преобразователя поверхностных акустических волн Рэлея, описанной в [12].

Особенностью использованного преобразователя является наличие в нем кроме излучателя и приемника поперечных волн, распространяющихся в исследуемой наплавке, дополнительного прямого совмещенного преобразователя (далее – дополнительного датчика), который формирует импульс продольной волны, распространяющийся в материале корпуса. Использование в конструкции дополнительного датчика преследовало две цели:

1) формирование опорного сигнала для точного определения задержки импульса поперечной волны;

2) учет влияния температуры на изменение базы за счет теплового расширения корпуса преобразователя.

Типичная осциллограмма, формируемая описанным преобразователем, приведена на рис. 3.

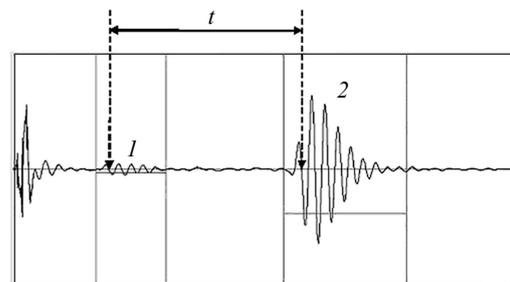


Рис. 3. Типичная осциллограмма для преобразователя с дополнительным датчиком: 1 – опорный импульс, формируемый дополнительным датчиком; 2 – отраженный импульс поперечной волны; t – контролируемая задержка импульса поперечной волны

Fig. 3. A typical oscillogram for a probe with an additional sensor: 1 - reference pulse generated by additional sensor; 2 - reflected shear wave pulse; t - controlled pulse delay of the shear wave

В качестве первичных излучателей и приемников упругих волн использовались механически задемпфированные пластинки из пьезокерамики ЦТС-19 с резонансной частотой $f = 5$ МГц в форме прямоугольников, ориентированных короткой стороной вдоль преобразователя.

Для оценки возможности проведения измерений в ближней зоне оценим ее длину N по приближенной формуле [13]

$$N \approx \frac{Sf}{V_l^M}, \quad (7)$$

где S – площадь поверхности излучателя.

Размеры излучателя составляли 3×10 мм.

Из формулы (7) получаем

$$N > 60 \text{ мм.} \quad (8)$$

Из рис. 2 следует, что максимальное расстояние от излучателя до границы наплавки r_{\max} , определяемое в лучевом направлении и соответствующее максимально возможной контролируемой толщине наплавки h_{\max} , можно определить по формуле

$$r_{\max} = \frac{h_{\max}}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_l^M \sin \alpha_l^{\text{опт}}}{V_l^{\text{опт}}} \right)^2}}. \quad (9)$$

Расчет по формуле (9) для максимальной толщины наплавки h_{\max} , равной 5 мм, дает приблизительное значение r_{\max} , равное 6 мм, что заведомо меньше длины ближней зоны.

Поскольку использовались нефокусирующие излучатели, форму границы ближней зоны можно считать близкой к прямоугольному параллелепипеду. В этой связи для увеличения диапазона контролируемых толщин наплавки были увеличены размеры пьезопластины-приемника до значений 4×10 мм.

Упрощенно изобразить лучевую картину ультразвуковых пучков при контроле толщины наплавки в диапазоне $h_{\min} \dots h_{\max}$ можно в виде, представленном на рис. 4.

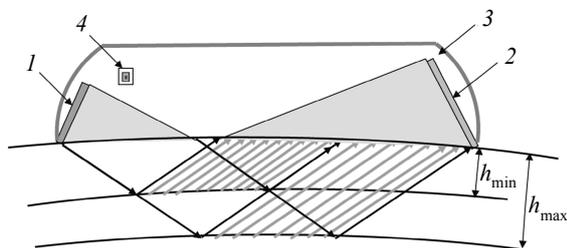


Рис. 4. Лучевая картина ультразвуковых пучков при контроле толщины наплавки в диапазоне $h_{\min} \dots h_{\max}$: 1 – излучатель; 2 – приемник; 3 – корпус; 4 – дополнительный датчик

Fig. 4. Radiation pattern of the ultrasonic beams under the control of the thickness of surfacing in the range $h_{\min} \dots h_{\max}$: 1 - emitter; 2 - receiver; 3 - housing; 4 - additional sensor

Экспериментальная проверка возможности контроля толщины наплавки проводилась на специально изготовленных образцах с известной толщиной наплавки в интересующем диапазоне 2...5 мм.

На рис. 5 приведены результаты измерений задержки импульса поперечной волны в зависимости от толщины наплавки.

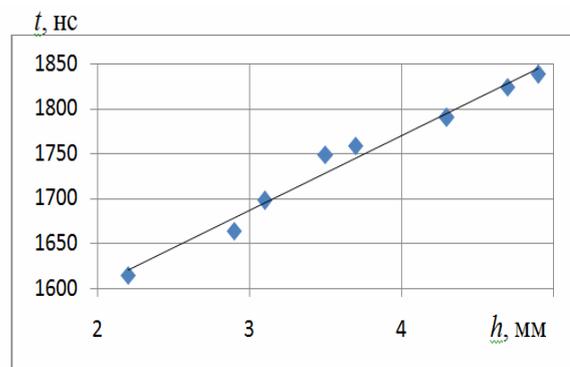


Рис. 5. Зависимость задержки импульса поперечной волны от толщины наплавки

Fig. 5. The dependence of the pulse delay of the shear wave to the thickness surfacings

Обработка экспериментальных данных показала, что коэффициент корреляции между толщиной наплавки h и задержкой t близок к 1, что позволяет использовать линейную аппроксимацию зависимости $t(h)$, из которой получаем следующую формулу для определения толщины наплавки по измеренной задержке:

$$h = \frac{t - 1440}{82,9}. \quad (10)$$

Метрологически обеспеченная абсолютная погрешность измерения задержки с помощью ИВК «АСТРОН» составляет ± 2 нс, из чего следует, что расчетная погрешность определения толщины наплавки не превышает $\pm 0,02$ мм, обеспечивая значительный метрологический запас погрешности при контроле толщины описанным методом.

Оценка возможности автоматизации процесса контроля толщины наплавки

Авторами была предпринята попытка автоматизации процесса контроля наплавки предложенным методом, для чего на базе токарно-винторезного станка (в качестве которого может быть использован любой станок по ГОСТ 18097–93) была создана установка, укрупненная функциональная схема которой приведена на рис. 6.

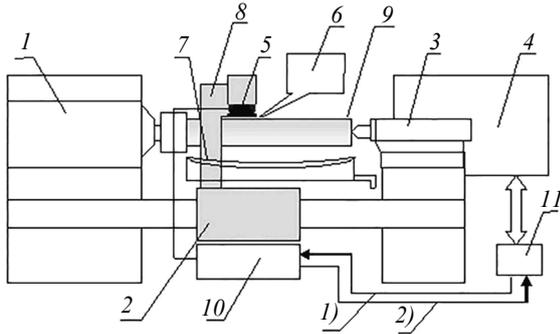


Рис. 6. Функциональная схема установки для контроля толщины наплавки на базе токарно-винторезного станка: 1 – передняя бабка; 2 – суппорт; 3 – задняя бабка; 4 – электропусковая аппаратура; 5 – ПЭП; 6 – устройство подачи контактной жидкости; 7 – устройство сбора контактной жидкости; 8 – устройство позиционирования преобразователя; 9 – деталь с наплавкой; 10 – ИВК «АСТРОН»; 11 – устройство связи ИВК «АСТРОН» со станком

Fig. 6. Functional diagram of the installation to control the thickness of the surfacing on the basis of the screw-cutting machine: 1 - headstock; 2 - caliper; 3 - tailstock; 4 - electric starting equipment; 5 - probe; 6 - the device flow contact of the liquid; 7 - a device for collecting contact liquid; 8 - positioning device of the inverter; 9 - detail with surfacing; 10 - measuring and computing complex "ASTRON"; 11 - communication device

Связь станка с ИВК «АСТРОН» осуществлялась по двум двухпроводным линиям (витым парам). Координатная привязка результатов акустических измерений к поверхности сканирования осуществлялась с помощью фотометок, соответствующих начальной и конечной точкам измерений.

Измерения проводились при частоте вращения контролируемой детали 20 об/мин. Контроль осуществлялся в точках, расположенных через $22,5^\circ$ вдоль поверхности детали.

Результаты измерения толщины наплавки, полученные с помощью описанной установки, приведены на рис. 7 в виде экранной формы на видеоконтрольном устройстве ИВК «АСТРОН».

Многочисленные измерения наплавки в одной и той же кольцевой зоне показали воспроизводимость результатов с погрешностью $\pm(0,05-0,1)$ мм, что свидетельствует о перспективности предложенного варианта автоматизации измерений. Изменение угла поворота контролируемой детали и скорости подачи программными средствами позволяет менять шаг измерения как по окружности, так и вдоль оси детали. Предусмотрена возможность непрерывного сканирования всего изделия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ НАПЛАВКИ																
№ зоны	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Угол, гр	0,0	22,5	45,0	67,5	90,0	112,5	135,0	157,5	180,0	202,5	225,0	247,5	270,0	292,5	315,0	337,5
Н, мм	3,81	4,28	3,92	4,49	3,93	4,77	4,03	4,37	4,98	3,55	3,64	4,52	4,19	4,85	4,22	3,88

Среднее значение толщины наплавки = 4,21 мм

Максимальное значение толщины наплавки = 4,98 мм В зоне № 9 (180,0 градусов)

Минимальное значение толщины наплавки = 3,55 мм В зоне № 10 (202,5 градусов)

Среднее квадратическое отклонение значений толщины = 0,11 мм

ПЕЧАТЬ ЗАПИСЬ В ФАЙЛ В (Выход)

Рис. 7. Результаты измерения толщины наплавки

Fig. 7. The results of measuring the thickness of the surfacing

Выводы

1. Рассмотрены особенности контроля толщины наплавки в случаях, когда акустические свойства материалов наплавки и основного металла близки.

2. Предложен раздельно-совмещенный сканирующий преобразователь поперечной волны для контроля наплавки, нанесенной на цилиндрическую поверхность.

3. Полученные результаты свидетельствуют о возможности ультразвукового контроля толщины плазменной наплавки из медно-никелевого сплава на стальных цилиндрических деталях с высокой точностью – до 0,02 мм.

4. Предложен вариант автоматизации процесса контроля толщины наплавки описанным методом с погрешностью не более $\pm(0,05-0,1)$ мм.

Библиографические ссылки

1. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий : монография / А. И. Потапов [и др.]. СПб. : Нестор-История, 2014. 480 с.
2. Методы и средства электромагнитной толщинометрии покрытий металлических изделий / В. А. Сясько [и др.] // Контроль. Диагностика. 2017. № 12. С. 10–17.
3. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая толщинометрия в машиностроении // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 2. С. 26–28.
4. Булатов А. С., Сясько В. А. Современные ультразвуковые методы измерения остаточной толщины стенок металлических изделий под защитными покрытиями // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19, № 3. С. 4–8.
5. Щербинский В. Г., Алёшин Н. П. Ультразвуковой контроль сварных соединений : монография. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 496 с.
6. Данилов В. Н., Разыграев А. Н., Цуканов М. В. О диаграмме направленности совмещенного наклонного преобразователя при ультразвуковом контроле металла через плакирующий слой // Контроль. Диагностика. 2019. № 1. С. 12–19.
7. Yeh C.N., Wu T.C., Yang C.H. [Nondestructive measurement material characterization of thermal sprayed aluminum coatings by using laser ultrasound technique]. *Physics Procedia*, 2015, vol. 70, pp. 492-495.
8. Гуревич С. Ю., Петров Ю. В., Голубев Е. В. Измерение толщины тонких металлоизделий с помощью ультразвука, возбуждаемого лазерными нанопульсами // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 3–6.
9. Исследование технологии ультразвукового контроля толщины ЭМА-методом / Н. П. Разыграев [и др.] // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 60–68.
10. Захаров А. В., Тимошенко Ю. А. О некоторых особенностях применения ультразвукового спектрального метода для измерения толщины изделий // Дефектоскопия. 1986. № 9. С. 54–58.
11. Шевалдыкин В. Г. Безэталонная толщинометрия на основе объемных акустических волн // Дефектоскопия. 1985. № 9. С. 19–26.
12. Углов А. Л., Ерофеев В. И., Смирнов А. Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации : монография. М. : Наука, 2009. 280 с.
13. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 2008. 864 с. Т. 3. Ультразвуковой контроль.

References

1. Potapov A.I. *Elektromagnitnie i magnitnie metodi nerazrushajushchego kontrolja materialov i izdelii* [Electromagnetic and magnetic methods of non-destructive testing of materials and products]. St. Petersburg, Nestor-History Publ, 2014, 480 p. (in Russ.).
2. Siasko V.A. [Methods and means of electromagnetic thickness measurement of metal products coatings]. *Kontrol. Diagnostika*, 2017, no. 12, pp. 10-17 (in Russ.).
3. Kretov E.F. [Ultrasonic thickness measurement in mechanical engineering]. *V mire nerazrushchajushchego kontrolja*, 2008, no. 2, pp. 26-28 (in Russ.).
4. Bulatov A.S., Siasko V.A. [Modern ultrasonic methods for measuring the residual wall thickness of metal products under protective coatings]. *V mire nerazrushajushchego kontrolja*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 4-8 (in Russ.).
5. Shcherbinskii V.G., Aleshin N.P. *Ul'trazvukovoi kontrol' svarnih soedinenii* [Ultrasonic inspection of welded joint]. Moscow, MGTU imeni Bauman Publ., 2000, 496 p. (in Russ.).
6. Danilov V.N., Raziagraev A.N., Tcukanov M.V. [On the directional diagram of the combined angle beam transducer during ultrasonic testing of metal via a plating layer]. *Kontrol. Diagnostika*, 2019, no. 1, pp. 12-19 (in Russ.).
7. Yeh C.N., Wu T.C., Yang C.H. Nondestructive measurement material characterization of thermal sprayed aluminum coatings by using laser ultrasound technique. *Physics Procedia*, 2015, vol. 70, pp. 492-495.
8. Gurevich S.Ju., Petrov Ju.V., Golubev E.V. [Thickness measurement of thin metal products using ultrasound excited by a laser nanopulse]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, no. 3, pp. 3-6 (in Russ.).
9. Raziagraev N.P. [Study on technology of the thickness ultrasonic inspection by the EMA method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, no. 6, pp. 60-68 (in Russ.).
10. Zakharov A.V., Timoshenkov Ju.A. [About some features of the ultrasonic spectral method application for measurement of thickness of products]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1986, no. 9, pp. 54-58 (in Russ.).
11. Shevaldikin V.G. [Non-Etalon thickness measurement based on volumetric acoustic waves]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1985, no. 9, pp. 19-26 (in Russ.).
12. Uglov A.L., Erofeev V.I., Smirnov A.N. *Akusticheskii kontrol' oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatatsii* [Acoustic control of equipment during manufacture and operation]. Moscow, Nauka Publ., 2009, 280 p. (in Russ.).
13. Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Ul'trazvukovoi kontrol'* [Ultrasonic testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 864 p. (in Russ.).

On Ultrasonic Control of the Thickness of Plasma Surfacing of Copper-Nickel Alloy on a Steel Cylindrical Surface

A.L. Uglov, DSc in Engineering, Nizhny Novgorod Research Center of Control and Diagnostics, Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

M.V. Kolesnikov, PhD in Engineering, Mechanical Engineering Research Institute named after V.V. Bahirev, Moscow, Russia

T.V. Bystryukova, Mechanical Engineering Research Institute named after V.V. Bahirev, Moscow, Russia

A.L. Bychkov, Mechanical Engineering Research Institute named after V.V. Bahirev, Moscow, Russia

It is known that in order to improve the performance of metal products the surfacing, in particular, plasma ones are widely used. The paper investigates the plasma surfacing of a copper-nickel alloy deposited on a cylindrical steel surface. The requirements are increased for surfacing: the stability of the coating thickness, the absence of macroscopic defects in the form of cracks and nonpenetration both in the solid of the surfacing and in the fusion zone.

Provided that the acoustic properties of copper-nickel surfacing and the base metal are similar in their characteristics, it is quite difficult to ensure the control of the quality of the surfacing by existing methods (based on acoustic methods), especially in mass production. Therefore, there is a need for further development of existing methods and techniques of control.

To solve this problem, the conducted studies have shown that it is possible to use a slope transducer of transverse waves with an input angle that provides control of the given coating thickness with an error of 0.02 mm. The experimental data obtained by the acoustic method are confirmed by the results of chemical etching. Also, according to the results of these studies, an automatic control of the coating thickness with the output of the control results in the database and on the monitor screen is proposed.

Keywords: ultrasonic testing, surfacing, coating thickness, acoustic impedance.

Получено 06.08.2019

Образец цитирования

Об ультразвуковом контроле толщины плазменной наплавки из медно-никелевого сплава на стальную цилиндрическую поверхность / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов, М. В. Колесников, Т. В. Быстрыюкова, А. Л. Бычков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 3–10. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-3-10.

For Citation

Uglov A.L., Khlybov A.A., Kolesnikov M.V., Bystryukova T.V., Bychkov A.L. [On ultrasonic control of the thickness of plasma surfacing of copper-nickel alloy on a steel cylindrical surface]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 3-10 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-3-10.