DOI *10.18454/PMI.2016.5.712*

УДК 620.179.147

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ НАПЫЛЯЕМЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЧУГУННЫХ ИЗДЕЛИЯХ

В.А.СЯСЬКО
Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В современных производствах все шире применяется автоматическое напыление жаропрочного никелевого покрытия толщиной T = 1-3 мм на крупногабаритные изделия из чугуна с шаровидным графитом. Процесс нанесения покрытия характеризуется зависимостью его относительной магнитной проницаемости μ_c от времени релаксации, длительность которой может доходить до 24 ч, а также девиацией μ_c от точки к точке на поверхности.

Рассмотрены вопросы применения вихретокового фазового метода для измерения толщины покрытия. Представлены структура вихретоковых четырехобмоточных трансформаторных преобразователей и результаты расчета и оптимизации их параметров, рассмотрено влияние контролируемого и мешающих параметров. На основании этого разработан двухканальный совмещенный измерительный преобразователь, обеспечивающий погрешность измерения $\Delta T \le \pm (0{,}03T + 0{,}02)$ мм в цеховых условиях в процессе нанесения покрытия и при выходном контроле. Изложены результаты испытаний на контрольных образцах и применения на производстве.

Ключевые слова: вихретоковый фазовый метод, толщина покрытий, измерительный преобразователь.

Как цитировать эту статью: Сясько В.А. Измерение толщины напыляемых никелевых покрытий на крупногабаритных чугунных изделиях // Записки Горного института. Т.221. С.712-716. DOI 10.18454/PMI.2016.5.712.

Напыляемые никелевые покрытия обеспечивают высокие теплозащитные свойства крупногабаритных изделий из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Большинство современных технологических процессов изготовления рассматриваемого оборудования регламентируют нанесение покрытий толщиной до 3 мм для обеспечения требуемого уровня температурной защиты.

Нанесение толстослойного никелевого покрытия и обеспечение заданного значения T является сложной и весьма дорогостоящей технологической операцией.

Метод напыления материала покрытия является более приемлемым для данной задачи. Однако в процессе нанесения покрытия поверхность изделия не должна нагреваться свыше 100-120 °С, так как при несоблюдении данного условия может начаться процесс рекристаллизации графитовой фазы чугуна, возникновение критических полей напряжений в его объеме и, соответственно, снижение прочностных свойств. Поэтому используется метод электродуговой металлизации напылением, при котором, в отличие от газопламенных методов нанесения, поверхность изделия не нагревается выше 100°С.

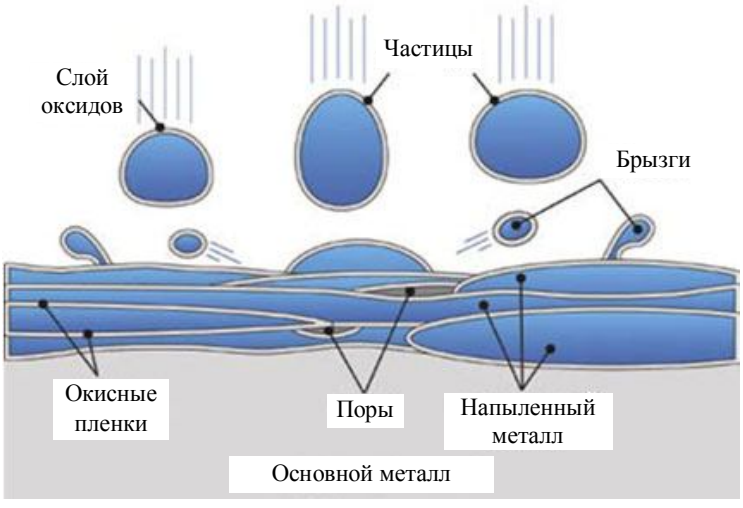


Рис.1. Процесс образования металлизационного покрытия и его структура на поверхности изделия

При электродуговой металлизации расплавленный металл подхватывается струей сжатого воздуха, истекающей из центрального сопла металлизатора, и в виде мелко распыленных частиц с высокой скоростью переносится на поверхность изделия.

Процесс образования металлизационного покрытия и его структура на поверхности изделия представлены на рис.1.

Нанесение покрытия должно производиться сразу после снятия консервационной смазки, пескоструйной обработки и очистки поверхности продувкой, так как активированная поверхность металла очень быстро покрывается оксидной пленкой.

Нанесение покрытия осуществляется с использованием специализированных роботизированных комплексов. Рассмотрим одну из типовых задач нанесения никелевых покрытий на внутреннюю поверхность крупногабаритных цилиндрических изделий диаметром до 1500 мм и длиной до 7000 мм. Специализированный автоматизированный комплекс, изготовленный на базе токарного станка и пятикоординатного сварочного робота, представлен на рис.2.

DOI 10.18454/PMI.2016.5.712

Изделие закрепляется в патроне токарного станка. Частота вращения изделия 3-7 об/мин. Подача проволоки, регулировка тока и давления воздуха осуществляется на блоке управления металлизатора, закрепленного на штанге.

Полное время нанесения покрытия в зависимости от требуемого значения T составляет 24-36 ч.

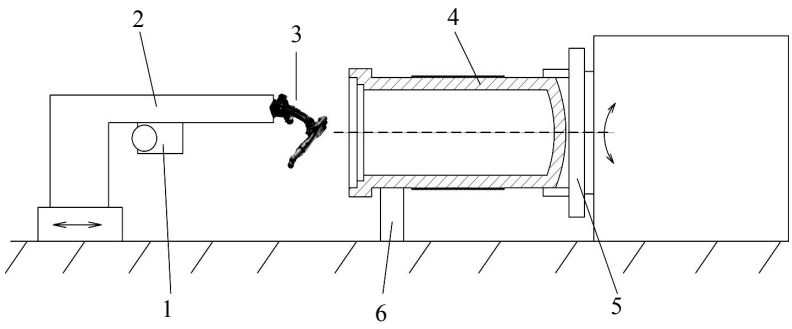


Рис.2. Структура специализированного роботизированного комплекса для нанесения никелевого покрытия на внутреннюю поверхность цилиндрических изделий

1 – металлизатор; 2 – штанга; 3 – сварочный робот; 4 – изделие; 5 – шпиндель с патроном; 6 – люнет

Покрытие наносится участками (поясами) длиной порядка 1 м по оси изделия при его вращении и возвратно-поступательном перемещением штанги с роботом. Процесс нанесения покрытия не должен прерываться более чем на 10 мин для обеспечения адгезии слоев и исключения их растрескивания. Этот допустимый интервал времени прерывания процесса напыления металла может быть использован для контроля T с возможностью последующего нанесения дополнительных слоев при необходимости без нарушения свойств покрытия. Кроме того, необходимо производить выходной контроль толщины покрытия на всей поверхности с заданной дискретностью.

В рассматриваемой задаче измерения никелевое покрытие толщиной 1-3 мм и основание являются магнитными электропроводящими. Для измерения T оптимальным является использование вихретокового фазового метода (ГОСТ 18353-79, ГОСТ 8.502-84) [1].

Структурная схема трансформаторного трехобмоточного вихретокового фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис.3.

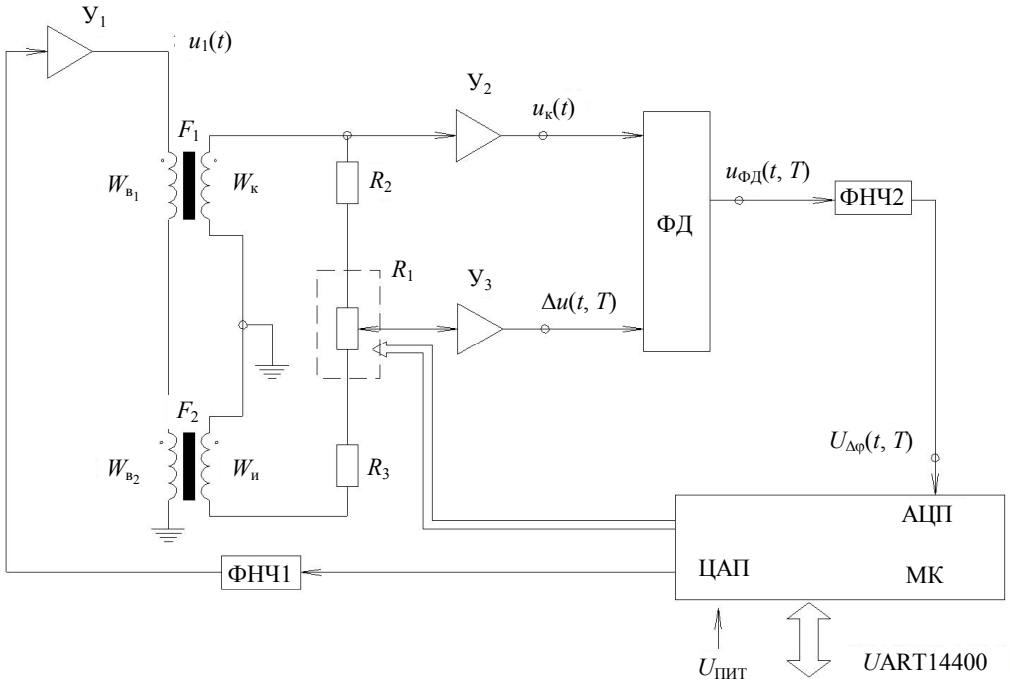


Рис.3. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя

$У_1$ – $У_3$ – усилители; ФД – фазовый детектор; ФНЧ1 – ФНЧ2 – фильтры низкой частоты; $W_{в_1}$, $W_{в_2}$ – обмотки возбуждения; $W_к$ и $W_и$ – дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки; МК – микроконтроллер; R_1 – управляемый цифровой балансировочный потенциометр; F_1, F_2 – ферритовые броневые сердечники

Обмотка $W_в$ записывается синусоидальным напряжением $u_1(t)$ частоты f. Усиленное разностное (вносимое) напряжение $\Delta u(t, T)$ поступает на фазовый детектор ФД. Опорным сигналом для фазового детектора служит $u_к(t)$ с выхода компенсационной обмотки $W_к$. $U_{\Delta\varphi}(t, T)$ на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз $\Delta\varphi$ между напряжением $u_к(t)$ и разностным (вносимым) на-

DOI *10.18454/PMI.2016.5.712*

пряжением $\Delta u(t, T)$. Балансировка обмоток преобразователя производится с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером (ГОСТ Р ИСО 12718-2009) [2].

Для анализа характеристик измерительного преобразователя удобно использовать обобщенный информативный параметр [3]:

$$\beta = R\sqrt{2\pi f\sigma_c\mu_c\mu_0}\ ,$$

где R – эквивалентный радиус обмотки возбуждения; f – частота тока возбуждения; σ_c – интегральная электропроводность покрытия; μ_0 – магнитная постоянная; μ_c – относительная магнитная проницаемость покрытия.

Для обеспечения необходимой чувствительности при измерениях необходимо иметь следующий диапазон вариации обобщенного параметра [11, 12]:

$$\beta = 2 - 10\ .$$

При этом глубина проникновения δ электромагнитного поля

$$\delta = 1\Big/\sqrt{\pi f\sigma_c\mu_c\mu_0}\ .$$

Максимальная измеряемая толщина покрытия [ISO 21968-2005]

$$T_{\max} = (0{,}6 - 0{,}8)\delta\ .$$

У рассматриваемого покрытия $\sigma_c \approx 1{,}5$ и $\mu_c \approx 20$, а $T_{\max} = 3$. Расчеты показали, что выполнение указанных выше условий обеспечивается при $f \approx 1$ кГц и $R = 19$ мм.

Контроль T должен производиться после нанесения каждого очередного участка покрытия и при выходном контроле (после нанесения покрытия на всю внутреннюю поверхность изделия). Время контроля каждого очередного участка не должно превышать 10 мин, так как только в этом случае при необходимости можно нанести дополнительные слои покрытия без его последующего нарушения сплошности (расслоения или растрескивания) [4]. При электродуговом методе нанесения покрытия скорость расплавления и последующего остывания металла покрытия очень высокая, в результате этого градиент температуры приводит к появлению в покрытии значительных напряжений. Механические напряжения в свою очередь изменяют физические параметры покрытия, в том числе и магнитные свойства никеля [5, 6, 10].

Исследования подтвердили, что в процессе релаксации параметров покрытия в нем действительно возникают внутренние напряжения, приводящие к изменению μ_c: от $\mu_{c_{\min}}$ (соответствующей моменту сразу после нанесения покрытия) до $\mu_{c_{\max}}$ (примерно через 24 ч после нанесения покрытия) [15].

Анализ публикаций показал, что пока не найдено явных аналитических зависимостей, связывающих магнитные характеристики ферромагнетиков с возникающими в них упругими механиче-

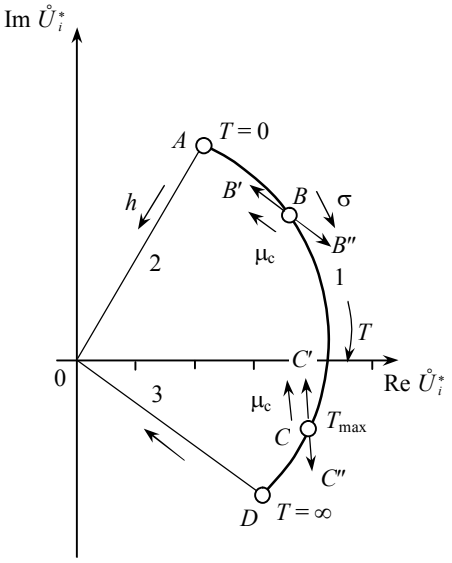


Рис.4. Зависимость относительного вносимого напряжения $\mathring{U}_i^* = \mathring{U}_i/|\mathring{U}_0|$ от информативного и мешающих параметров при измерении T

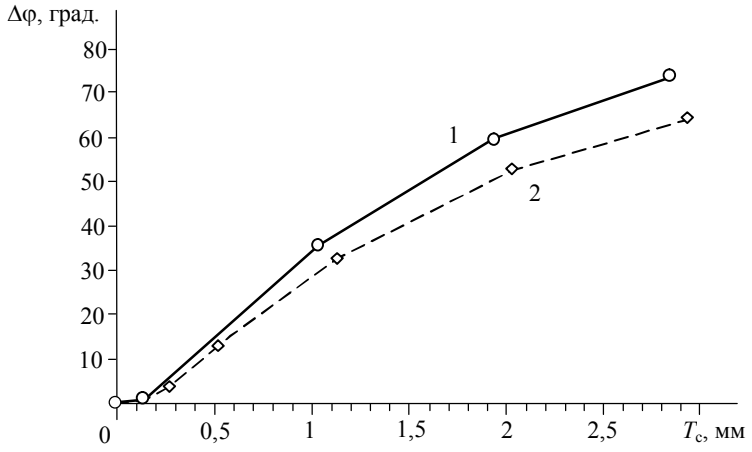


Рис.5. Зависимость фазового сдвига от толщины покрытия: при измерениях сразу после нанесения покрытия (1) и через 12 ч (2)

DOI 10.18454/PMI.2016.5.712

скими напряжениями. Прежде всего, это обусловлено изменчивыми свойствами самого ферромагнетика и его текстуры. В общем случае

$$\mu_{c_{max}} = \mu_{c_{min}} / (1 - \alpha\lambda_0 P),$$

где α – постоянный коэффициент; λ_0 – начальная магнитострикция ферромагнитного материала покрытия; P – механическая нагрузка в покрытии, возникающая вследствие механических напряжений.

Таким образом, условия проведения измерений при технологическом контроле в пределах участка при нанесении покрытия и при выходном контроле по участкам после нанесения всего покрытия будут существенно отличаться из-за различного значения μ_c, что может вызвать недопустимую погрешность измерения [9].

Зависимость относительного вносимого напряжения $\dot{U}_i^* = \dot{U}_i / |\dot{U}_0|$ от информативного и мешающих параметров представлена на рис.4.

На рис.4 линия 1 (годограф $\dot{U}_i^*(T)$) показывает влияние T (точка А соответствует $T = 0$, точка C – $T = T_{max}$, а точка D – $T = \infty$). Линии 2 и 3 (годограф $\dot{U}_i^*(h)$) демонстрируют отстройку от влияния зазора h между преобразователем и поверхностью изделия на результат измерения (при изменении h информативный параметр Δφ не изменяется). Линии $B'BB''$ и $C'CC''$ иллюстрируют влияние вариации μ_c в диапазоне от значения $\mu_{c_{min}}$ (соответствующего точкам B'' и C'') до $\mu_{c_{max}}$ (соответствующего точкам B' и C') [16].

На рис.5 представлены зависимости $\Delta\varphi(T)$ при измерениях сразу после нанесения покрытия и через 12 ч (практически после окончания релаксации его параметров). Видно, что они зависят от времени. Если не учитывать это изменение в процессе релаксации, то погрешность измерений может доходить до ± 1 мм, в зависимости от того, как выполнялась градуировка преобразователя при его изготовлении.

Для оценки изменения магнитных характеристик покрытия в состав прибора должен быть введен второй вихретоковый измерительный преобразователь, у которого $\delta < T_{min} = 1$ мм при ß = 2-4. При этом можно утверждать, что у этого преобразователя $\Delta\varphi_2$ будет зависеть только от μ_c при постоянстве σ_c [14].

Выполненные расчеты и эксперименты показали, что оптимальными для этого преобразователя будут следующие параметры: частота тока возбуждения $f \approx 16$ кГц, эквивалентный радиус обмотки возбуждения $R_1 = 3$ мм. Конструкция обмоток совмещенного двухканального измерительного преобразователя представлена на рис.6. Компенсационные и измерительные обмотки второго вихретокового преобразователя имеют ферритовые полуброневые сердечники, что повышает чувствительность [15].

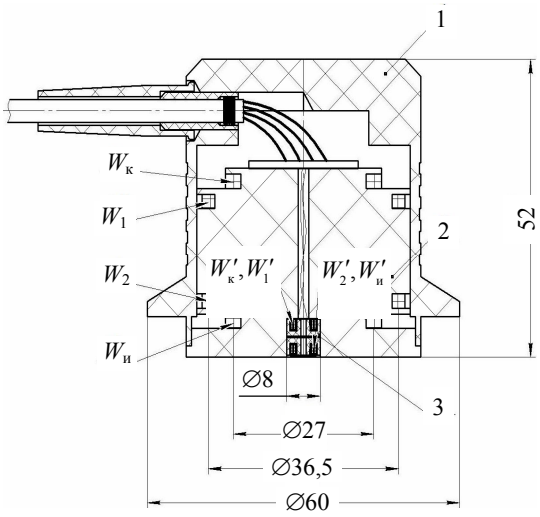


Рис.6. Конструкция совмещенного двухканального измерительного преобразователя:

1 – корпус; 2 – чувствительный элемент преобразователя для измерения толщины покрытия; 3 – чувствительный элемент преобразователя для оценки магнитных характеристик покрытия

Для градуировки и проверки работоспособности преобразователя была изготовлена натурная мера толщины, представляющая собой плоскопараллельное прямоугольное основание из высокопрочного чугуна размерами 150×150 мм и толщиной 70 мм, на одну из поверхностей которого нанесено четыре сектора покрытия разной толщины. Покрытие наносилось роботизированной установкой. Режимы и траектории движения металлизатора были максимально приближены к технологическим при нанесении покрытия на корпус контейнера. Толщина покрытия на секторах измерялась методом прямых измерений. Зависимости $\Delta\varphi(T, t)$ для первого и второго $\Delta\varphi_2(\mu_c, t)$ преобразователя снимались на временном интервале 24 ч (от момента окончания нанесения до полной релаксации параметров покрытия). По результатам совместной математической обработки зависимостей был разработан алгоритм, при котором в каждой точке контроля сначала измеряются $\Delta\varphi_2$ и Δφ, после чего с использованием $\Delta\varphi(T, t)$, соответствующей измеренному значению $\Delta\varphi_2$, вычисляется T.

На основании выполненных исследований был разработан совмещенный преобразователь к толщиномеру покрытий «Константа К6С». Испытания показали, что прибор обеспечивает погрешность измерения $\Delta T \le \pm(0{,}03T + 0{,}02)$ мм в диапазоне толщин покрытия от 1 до 3 мм в процессе его нанесения и при выходном контроле (сразу после окончания нанесения покрытия на всю поверхность изделия), подавляя влияние вариации его магнитных свойств.

***DOI** 10.18454/PMI.2016.5.712*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабаджанов Л.С.* Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий / Л.С.Бабаджанов, М.Л.Бабаджанова. М.: Издательство стандартов, 2004. 264 с.

2. *Дорофеев А.Л.* Теория и промышленное применение метода вихревых токов. М.: Машиностроение, 1969. 96 с.

3. *Дорофеев А.Л.* Электромагнитная дефектоскопия / А.Л.Дорофеев, Ю.Г.Казаманов. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.

4. *Константинов В.В.* Материаловедение для гальваников. М: Высшая школа, 1989. 80 с.

5. Неразрушающий контроль. Вихретоковый контроль: Справочник: В 7 т. / Под ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 2003. Т.2. Кн.2. 347 с.

6. *Потапов А.И.* Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / А.И.Потапов, В.АСясько. СПб: Гуманистика, 2009. 904 с.

7. *Сясько В.А.* Обеспечение достоверности результатов измерений толщины металлических покрытий магнитными и вихретоковыми методами в условиях машиностроительных производств / В.А.Сясько, А.Е.Ивкин // Метрология. 2011. № 2. С.3-12.

8. *Bailey D.* Shielded Eddy Current Probes // Material Evaluation. 1983. N 7. Vol.41. P.776-778.

9. *Blitz J.* Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing. London: Chapman and Hall, 1997. 261 p.

10. *Buvat F.* Eddy current modeling of ferrite-cored probes // Review of Progress in QNDE. Vol.24. 2005. P.463-470.

11. *Davis J.* Mathematic formulas and refferences for nondestructive tasting – Eddy Current // J.Davis, M.King. Las Vegas: NV: Art Room Corporation, 2001. 136 p.

12. *Hansen J.* Back to basics: The eddy current inspection // Insight. 2004. N 5. Vol.46. P.24-28.

13. *Le Ber L.* Advanced of simulation and expertise capabilities in CIVA platform // Review of Progress in QNDE. 2006. Vol.25. P.684-691.

14. *Ohshima K.* Research on numerical analyses modeling of SCC on eddy current testing / K.Ohshima, M.Hashimoto // Journal of the JSAEM. 2002. N 10. P.384-388.

15. *Syasko V.A.* Eddy current thickness monitoring of aerospace technics coatings and constructions / V.A.Syasko, I.V.Pilatova, A.E.Ivkin // 18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban, South Africa, 16-20 April, 2012. P.13. URL: http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/13_wcndtfinal00013.pdf

16. *Syasko V.A.* Optimization of structure and operation algorithms for electromagnetic plated coatings thickness meters with the use of digital technologies / V.A.Syasko, A.S.Bulatov, I.S.Pivovarov // 17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai, China. 25-28 October. 2008. 5 p.

***Автор* В.А.Сясько**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *9334343@gmail.com* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Россия*).

Статья принята к публикации 15.06.2016.