УДК 620.179.14

Определение толщин составляющих двухслойного никель-хромового покрытия магнитным пондеромоторным методом при одностороннем доступе к контролируемой поверхности

Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь*

*Поступила 21.09.2017
Принята к печати 09.11.2017*

Для придания камере сгорания жидкостного ракетного двигателя требуемых эксплуатационных свойств наиболее широкое применение нашло нанесение толстослойных никелевого (до 700 мкм) и хромового (до 200 мкм) покрытий. При этом главным параметром, определяющим способность покрытия выполнять свою функцию, является его толщина и равномерность ее распределения. Основной проблемой существующих в настоящее время неразрушающих методик определения толщин рассматриваемых покрытий является то, что они могут использоваться только на стадии производства изделий ракетной техники, когда есть доступ к изделию со стороны внутренней стенки камеры сгорания до и после нанесения хромового покрытия на подслой никеля. Однако когда уже готовое изделие поступает на последующие этапы сборки на другое предприятие, то часто встает вопрос входного контроля толщин покрытий из никеля и хрома. В данном случае применить существующие методики контроля на готовом изделии не представляется возможным либо их использование приводит к недопустимым погрешностям результатов измерений. Целью работы являлась разработка методики неразрушающего определения толщин описанных двухслойных покрытий магнитным пондеромоторным методом в условиях одностороннего доступа к готовому изделию со стороны хромового покрытия.

Предложена новая методика неразрушающего определения толщин никелевого и хромового покрытий двухслойной структуры на готовом изделии без априорных данных о свойствах или толщинах этих покрытий или изделия в целом с использованием магнитного пондеромоторного метода.

Разработанная методика реализована в толщиномере двухслойных никель-хромовых покрытий ТЭП-ХН1, который успешно применяется предприятиями ракетно-космической отрасли Российской Федерации.

Ключевые слова: толщинометрия, двухслойные покрытия, никель, хром, магнитный пондеромоторный метод.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

Адрес для переписки:
*Гнутенко Е.В.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: gnutenkoev@gmail.com*

Address for correspondence:
*Gnutenko Y.V.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: gnutenkoev@gmail.com*

Для цитирования:
Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.
Определение толщин составляющих двухслойного никель-хромового покрытия магнитным пондеромоторным методом при одностороннем доступе к контролируемой поверхности.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 4. С. 365–373.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

For citation:
Gnutenko Y.V., Rudnitsky V.A.
[Determination of the thickness of the components of a double-layer nickel-chromium coating by magnetic ponderomotive method with unilateral access to the controlled surface].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 4, pp. 365–373 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

Determination of the thickness of the components of a double-layer nickel-chromium coating by magnetic ponderomotive method with unilateral access to the controlled surface

Gnutenko Y.V., Rudnitsky V.A.

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus

Received 21.09.2017
Accepted for publication 09.11.2017

Abstract

The application of thick-layer nickel (up to 700 μm) and chromium (up to 200 μm) coatings has been widely used to give the combustion chamber of a liquid-propellant rocket engine the required operational properties. The main parameter that determines the ability of a coating to fulfill its function is its thickness and uniformity of its distribution. The main problem of current nondestructive methods for determining the thickness of coatings under consideration is that they can be used only at the stage of production of rocket engineering products, when there is an access to the product from the side of the inner wall of the combustion chamber before and after applying a chromium coating to the nickel sublayer. However, when an already finished product arrives at subsequent stages of assembly to another enterprise, there is often a need of incoming control of the thicknesses of coatings from nickel and chromium. In this case, it is not possible to apply existing control techniques to a finished product, or the use of these techniques leads to unacceptable errors in the results of measurements. The goal of the research was to develop a technique for nondestructive determination of the thickness of each component of the two-layer nickel-chromium coating by the magnetic ponderomotive method under conditions of unilateral access to the finished product from the side of the chromium coating.

A new technique for nondestructive determination of the thicknesses of nickel and chromium coatings of the double-layer structure on a finished product without a priori data on the properties or thicknesses of these coatings or a product in general is proposed using a magnetic ponderomotive method.

This newly developed technique is implemented in the thickness gauge TEP-XN1 of double-layer nickel-chromium coatings, which is successfully used by enterprises of the rocket and space industry of the Russian Federation.

Keywords: thickness gauging, double-layer coatings, nickel, chromium, magnetic ponderomotive method.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

Адрес для переписки:
Гнутенко Е.В.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: gnutenkoev@gmail.com

Address for correspondence:
Gnutenko Y.V.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: gnutenkoev@gmail.com

Для цитирования:
Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.
Определение толщин составляющих двухслойного никель-хромового покрытия магнитным пондеромоторным методом при одностороннем доступе к контролируемой поверхности.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 4. С. 365–373.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

For citation:
Gnutenko Y.V., Rudnitsky V.A.
[Determination of the thickness of the components of a double-layer nickel-chromium coating by magnetic ponderomotive method with unilateral access to the controlled surface].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 4, pp. 366–374 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

Введение

Характеристики и надежность современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) во многом определяются свойствами специальных покрытий, применяемых при их производстве [1, 2]. Одним из основных элементов любого ЖРД является камера сгорания. Для придания ей требуемых эксплуатационных свойств наиболее широкое применение нашло нанесение толстослойных никелевого (Ni, до 700 мкм) и хромового (Cr, до 200 мкм) покрытий. При этом главным параметром, определяющим способность покрытия выполнять свою функцию, является его толщина и равномерность ее распределения [3, 4].

Важно отметить, что камера сгорания является весьма сложным изделием для неразрушающего контроля, так как представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких оболочек с изменяющейся толщиной и геометрией, выполненных из различных материалов. Так, стенка камеры сгорания в разрезе состоит из двухслойного никель-хромового покрытия, нанесенного на бронзовую оболочку стального корпуса. Все перечисленные факторы обуславливают необходимость разработки специализированных толщиномеров. В настоящее время широкое применение для контроля толщин покрытий таких изделий нашли магнитные толщиномеры, в частности основанные на пондеромоторном или магнитоотрывном методе [5], поскольку данный метод практически не чувствителен к кривизне поверхности контролируемого изделия и изменению толщины стенок камеры сгорания.

Основной проблемой существующих в настоящее время неразрушающих методик [6, 7, 8] определения толщин рассматриваемых покрытий является то, что они могут использоваться только на стадии производства изделий ракетной техники, когда есть доступ к изделию со стороны внутренней стенки до и после нанесения хромового покрытия на подслой никеля. Однако когда уже готовое изделие поступает на последующие этапы сборки на другое предприятие, то часто встает вопрос входного контроля толщин покрытий из никеля и хрома. В данном случае применить предложенные методики контроля, описанные в [6, 7, 8], на готовом изделии не представляется возможным либо их использование приводит к недопустимым погрешностям результатов измерений. Это вызвано взаимным влиянием толщины хромового покрытия на результат измерения толщины никелевого покрытия и толщины никелевого покрытия на результат измерения толщины хромового покрытия. Поэтому вопрос об определении толщин компонентов двухслойных никель-хромовых покрытий является достаточно важным и практически значимым. Целью работы являлась разработка методики неразрушающего определения толщин описанных двухслойных покрытий магнитным пондеромоторным методом в условиях одностороннего доступа к готовому изделию со стороны хромового покрытия.

Методика

Представленные в данной статье результаты экспериментальных исследований были получены авторами в рамках выполнения данной работы с помощью нового разработанного толщиномера двухслойных никель-хромовых покрытий ТЭП-ХН1 с использованием образцов никелевых фольг четырех номиналов толщин (200 мкм, 300 мкм, 400 мкм, 700 мкм), а также четырех немагнитных пленок толщиной 50 мкм, 90 мкм, 125 мкм и 185 мкм. Будем считать, что применяемые никелевые фольги являются полным аналогом никелевого покрытия нанесенного на немагнитное основание, а немагнитные пленки являются имитаторами хромового покрытия.

Теоретической основой для решения обозначенной задачи является работа [8], в которой на основании использования понятия скалярного магнитного потенциала получено обобщенное аналитическое выражение для оценки силы притяжения постоянного магнита к двухслойной структуре в виде никель-хромового покрытия, нанесенного на немагнитное основание.

Из анализа этого выражения можно сделать вывод, что применяя два различных по своим характеристикам устройства для пондеромоторной толщинометрии двухслойных никель-хромовых покрытий, на одном и том же изделии мы получаем систему из двух уравнений (1) с двумя неизвестными толщинами никелевого h_{Ni} и хромового h_{Cr} покрытий:

$$\begin{cases} F_1(h_{\mathrm{Ni}}, h_{\mathrm{Cr}}) = -k_1 \pi \mu_{\mathrm{Ni}} J_M a_1 h_{\mathrm{Ni}} \left(1 - 3\dfrac{h_{\mathrm{Cr}}}{a_1} + 6\dfrac{h_{\mathrm{Cr}}^2}{a_1^2}\right), \\ F_2(h_{\mathrm{Ni}}, h_{\mathrm{Cr}}) = -k_2 \pi \mu_{\mathrm{Ni}} J_M a_2 h_{\mathrm{Ni}} \left(1 - 3\dfrac{h_{\mathrm{Cr}}}{a_2} + 6\dfrac{h_{\mathrm{Cr}}^2}{a_2^2}\right), \end{cases} \quad (1)$$

где F_1, F_2 – результаты измерения силы отрыва постоянного магнита от двухслойного никель-хро-

мового покрытия на немагнитном основании для первого и второго устройств соответственно, Н; k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности, характеризующие конструктивное исполнение двух рассматриваемых устройств; μ_{Ni} – магнитная восприимчивость никелевого покрытия; J_M – намагниченность постоянного магнита, определяемая свойствами материала из которого изготовлен магнит, А·м^2; a_1, a_2 – полюсные расстояния постоянных магнитов в каждом из устройств, м.

Необходимо отметить, что данная система уравнений не имеет однозначного аналитического решения, а решить ее численно затруднительно в первую очередь из-за невозможности на практике точно определить полюсное расстояние магнитов. В приведенных уравнениях (1) малая ошибка в численном определении полюсного расстояния может приводить к значительной погрешности в определении толщин покрытий. К тому же полюсное расстояние постоянного магнита может изменяться вследствие его взаимодействия с другим ферромагнетиком [9].

Для решения представленной системы уравнений (1) авторами был предложен следующий подход, основанный на использовании физических закономерностей изменения силы притяжения постоянных магнитов применительно к рассматриваемым двухслойным покрытиям. Данный подход был положен в основу новой методики измерения, заключающейся в применении двух постоянных магнитов с различными полюсными расстояниями a, имеющих максимально возможное значение намагниченности. Исходя из последнего требования в качестве материала для изготовления магнитов нами был использован NdFeB (неодим-железо-бор). Как следует из анализа выражения, полученного в [8], магниты авторами были выбраны таким образом, чтобы один из них имел высокую чувствительность к толщине хромового покрытия, а второй – высокую чувствительность к толщине никелевого покрытия. Для этого первый магнит (магнит A) имел значительно меньшее полюсное расстояние a, чем второй магнит (магнит B). Регулировка полюсного расстояния a осуществлялась за счет изменения радиуса сферического наконечника постоянного магнита. В нашем случае для магнита A полюсное расстояние составляло примерно 0,4 мм, а для магнита B – порядка 2 мм.

Суть предлагаемой методики состоит в получении двух результатов измерений магнитоотрывного усилия двумя магнитами A и B в одной точке на поверхности хромового покрытия готового изделия и вычисления по полученным ранее зависимостям толщин никелевого и хромового покрытий. При этом происходит исключение взаимного влияния толщин покрытий на результат измерения их толщин за счет использовании «паразитной» чувствительности магнита B к толщине хромового покрытия.

Рассмотрим подробнее методику исключения влияния мешающих факторов на результат измерения. На основании полученных зависимостей силы притяжения F_{A0} магнита A к никелевому покрытию от его толщины в отсутствие хрома (рисунок 1) и силы притяжения F_B магнита B к различным никелевым покрытиям при наложении различных по толщине пленок-имитаторов

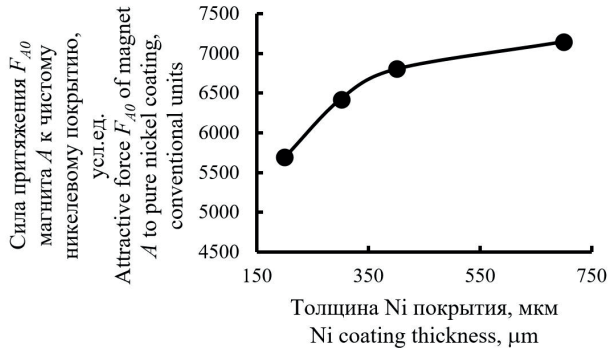

Рисунок 1 – Зависимость силы притяжения F_{A0} магнита A от толщины никелевого покрытия при отсутствии хромового покрытия

Figure 1 – Dependence of the attractive force F_{A0} of magnet A on the thickness of pure nickel coating in the absence of chrome coating

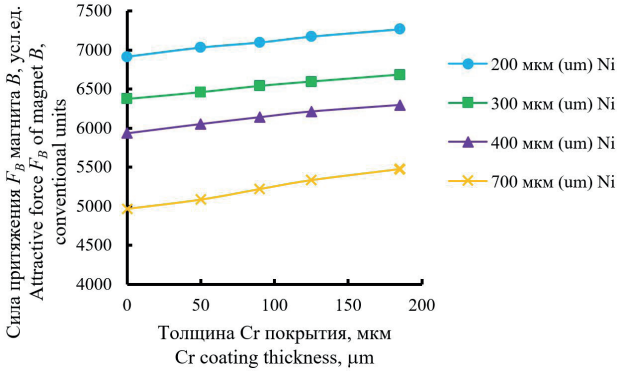

Рисунок 2 – Зависимость силы притяжения F_B магнита B к различным никелевым покрытиям от толщины хромового покрытия

Figure 2 – Dependence of the attractive force F_B of magnet B to the various nickel coatings on the thickness of chrome coating

хромового покрытия (рисунок 2), необходимо получить семейство кривых (рисунок 3), связывающих силу притяжения F_B магнита B к двухслойной никель-хромовой структуре и силу притяжения F_{A0} магнита A к чистому никелевому покрытию. Отметим, что в виду конструктивных особенностей прибора ТЭП-ХН1 приводимые нами для магнита B условные единицы измерения магнитоотрывного усилия на рисунке 2 и последующих графиках обратно пропорциональны силе притяжения постоянного магнита B.

Таким образом, каждому значению силы притяжения F_B магнита B, полученному на конкретной толщине никелевого покрытия h_{Ni} при наложении на него пленки-имитатора немагнитного хромового покрытия толщиной h_{Cr}, необходимо поставить в соответствие значение силы притяжения F_{A0} магнита A к чистому никелевому покрытию той же толщины h_{Ni}:

$$\begin{cases} F_{B1}\left(h_{\mathrm{Ni}1}, h_{\mathrm{Cr}1}\right) \to F_{A0_1}\left(h_{\mathrm{Ni}1}\right), \\ F_{B2}\left(h_{\mathrm{Ni}2}, h_{\mathrm{Cr}1}\right) \to F_{A0_2}\left(h_{\mathrm{Ni}2}\right), \\ \vdots \\ F_{Bn}\left(h_{\mathrm{Ni}n}, h_{\mathrm{Cr}1}\right) \to F_{A0_n}\left(h_{\mathrm{Ni}n}\right); \end{cases} \begin{cases} F_{B1}\left(h_{\mathrm{Ni}1}, h_{\mathrm{Cr}2}\right) \to F_{A0_1}\left(h_{\mathrm{Ni}1}\right), \\ F_{B2}\left(h_{\mathrm{Ni}2}, h_{\mathrm{Cr}2}\right) \to F_{A0_2}\left(h_{\mathrm{Ni}2}\right), \\ \vdots \\ F_{Bn}\left(h_{\mathrm{Ni}n}, h_{\mathrm{Cr}2}\right) \to F_{A0_n}\left(h_{\mathrm{Ni}n}\right); \end{cases} \ldots \begin{cases} F_{B1}\left(h_{\mathrm{Ni}1}, h_{\mathrm{Cr}m}\right) \to F_{A0_1}\left(h_{\mathrm{Ni}1}\right), \\ F_{B2}\left(h_{\mathrm{Ni}2}, h_{\mathrm{Cr}m}\right) \to F_{A0_2}\left(h_{\mathrm{Ni}2}\right), \\ \vdots \\ F_{Bn}\left(h_{\mathrm{Ni}n}, h_{\mathrm{Cr}m}\right) \to F_{A0_n}\left(h_{\mathrm{Ni}n}\right). \end{cases}$$

Данные зависимости (рисунок 3) представляют собой множество кривых, каждая из которых соответствует определенной толщине хромового покрытия. При этом изменение силы притяжения магнита A к чистому никелевому покрытию вдоль каждой из представленных кривых определяется толщиной никелевого покрытия.

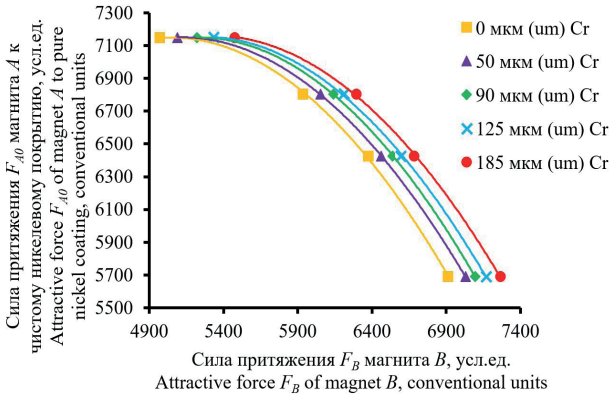

Рисунок 3 – Зависимость силы притяжения F_{A0} магнита A к чистому никелевому покрытию от силы притяжения F_B магнита B к двухслойной никель-хромовой структуре

Figure 3 – Dependence of the attractive force F_{A0} of magnet A to the pure nickel coating on the attractive force F_B of magnet B to the double-layer nickel-chromium coating

Из рисунка 3 видно, что конкретному значению силы притяжения магнита B соответствует множество возможных значений силы притяжения магнита A к свободному от хрома никелевому покрытию, определяемое реальной толщиной хромового покрытия, что дополнительно отражено на рисунке 4.

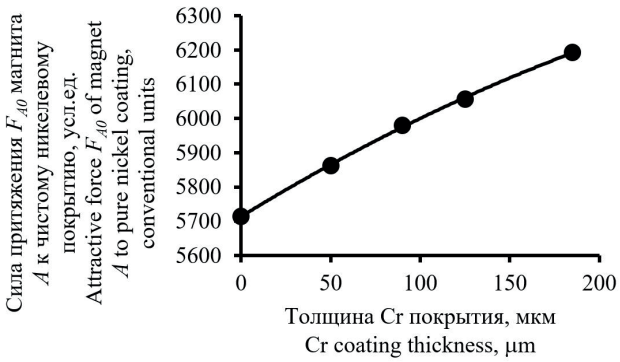

Рисунок 4 – Частная зависимость силы притяжения F_{A0} магнита A к чистому никелевому покрытию от толщины хромового покрытия соответствующая значению силы притяжения F_B магнита B (F_B = 6900 усл. ед.) к двухслойной никель-хромовой структуре в конкретной точке изделия

Figure 4 – Partial dependence of the attractive force F_{A0} of magnet A to the pure nickel coating on the thickness of Cr coating corresponding to the value of the attractive force F_B of magnet B (F_B = 6900 conventional units) to the double-layer nickel-chromium coating at a particular point of the product

Таким образом, при помощи построения зависимостей, изображенных на рисунке 3, мы исключили толщину никеля как мешающий фактор при определении толщины хромового покрытия на готовом изделии, используя для этого «паразитную» чувствительность магнита B к толщине хромового покрытия. Исключив влияние толщины никелевого покрытия, мы связали диапазон возможных значений силы притяжения F_{A0} магнита A к чистому никелевому покрытию в конкретной точке изделия с диапазоном возможных

реальных значений толщин хромового покрытия (см. рисунок 4).

Согласно номограммам для определения толщины хрома магнитом *A*, полученным в соответствии с методикой [8] и представленным на рисунке 5, сила притяжения F_{A0} магнита *A* к никелевому покрытию без хрома является базовым значением для расчета толщины хромового покрытия.

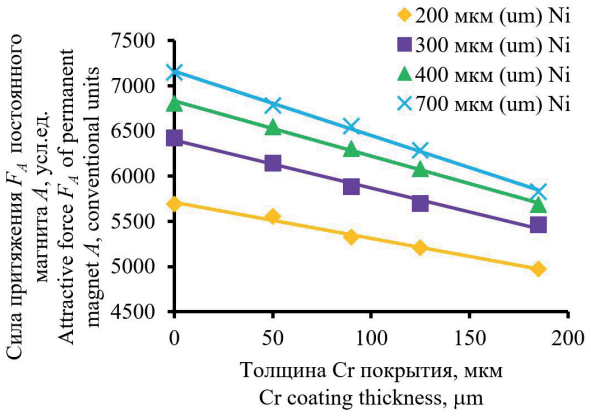

Рисунок 5 – Номограммы для определения толщины хромового покрытия магнитом *A*

Figure 5 – Nomograms for determining the thickness of chrome coating by using magnet *A*

Следовательно, для определения толщины хромового покрытия мы при помощи магнита *B* перешли от зависимости на рисунке 1, по которой, как отмечалось выше, невозможно работать на реальном изделии в виду отсутствия доступа к поверхности никелевого покрытия, к зависимости на рисунке 3.

Определим толщину хромового покрытия h_{Cr} располагая результатами измерения F_A магнитом *A* и F_B магнитом *B* отрывных усилий в одной точке на поверхности двухслойной никель-хромовой структуры готового изделия.

Как видно из рисунка 5, для силы притяжения F_A магнита *A* к двухслойной никель-хромовой структуре справедлива линейная зависимость вида:

$$F_A\left(F_{A0}, h_{Cr}\right) = -k\left(F_{A0}\right)h_{Cr} + F_{A0}, \quad (2)$$

где $k(F_{A0})$ – тангенс угла наклона номограмм для определения толщины хромового покрытия, F_{A0} – сила притяжения магнита *A* к никелевому покрытию без хрома (h_{Cr} = 0 мкм).

Тангенс угла наклона *k* номограмм для определения толщины хромового покрытия (рисунок 5) связан с силой притяжения F_{A0} магнита *A* на чистом никелевом покрытии (h_{Cr} = 0 мкм) нелинейной зависимостью, полученной на основании данных рисунка 5 и представленной на рисунке 6.

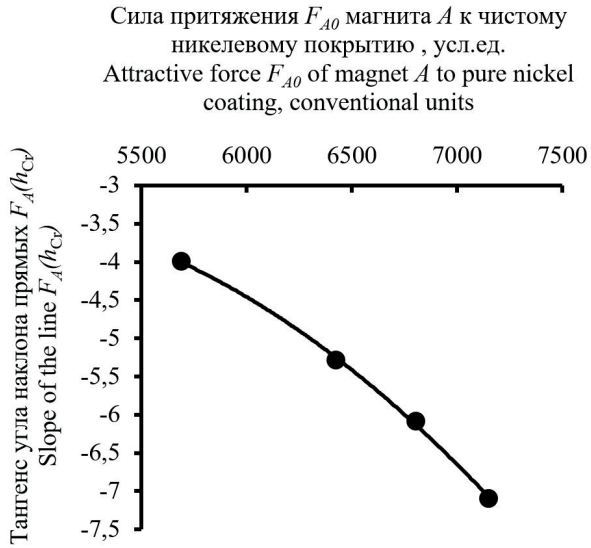

Рисунок 6 – Зависимость тангенса угла наклона прямых $F_A(h_{Cr})$ от силы притяжения F_{A0} магнита *A* к никелевому покрытию при отсутствии хромового покрытия

Figure 6 – Dependence of the slope of the line $F_A(h_{Cr})$ on attractive force F_{A0} of magnet *A* to the pure nickel coating in the absence of chrome coating

Согласно рисунку 6, зависимость $k(F_{A0})$ можно описать следующим образом:

$$k\left(F_{A0}\right) = -a_1F_{A0}^2 + b_1F_{A0} + c_1, \quad (3)$$

где a_1, b_1, c_1 – постоянные величины.

Подставляя измеренное значение силы притяжения F_B магнита *B* к двухслойной никель-хромовой структуре в конкретной точке изделия в зависимость, приведенную на рисунке 3, мы получим множество искомых значений силы притяжения $\{F_{A0_1}, F_{A0_2}, ..., F_{A0_i}\}$ магнита *A* к чистому никелевому покрытию, которые могут иметь место для данной точки изделия, что отражено на рисунке 4.

Полученное множество $\{F_{A0_1}, F_{A0_2}, ..., F_{A0_i}\}$ можно описать полиномом второй степени:

$$F_{A0}\left(h_{Cr}\right) = -a_2h_{Cr}^2 + b_2h_{Cr} + c_2, \quad (4)$$

где a_2, b_2, c_2 – постоянные величины.

Подставляя в выражение (2) уравнения (3) и (4) получим зависимость $F_A(h_{Cr})$:

$$F_A\left(h_{Cr}\right) = \left[a_1\left(-a_2h_{Cr}^2 + b_2h_{Cr} + c_2\right)^2 - b_1\left(-a_2h_{Cr}^2 + b_2h_{Cr} + c_2\right) + c_1\right]h_{Cr} - a_2h_{Cr}^2 + b_2h_{Cr} + c_2. \quad (5)$$

Таким образом, полученный результат измерения силы F_B на поверхности двухслойной никель-хромовой структуры и зависимости, представленные на рисунках 3 и 4, позволили в выражении (2) для силы притяжения магнита A исключить неизвестное нам значение силы притяжения F_{A0} магнита A к чистому никелевому покрытию и связать между собой F_A и h_{Cr} через постоянные коэффициенты. Т.е. мы перешли от функции двух аргументов $F_A(F_{A0}, h_{\mathrm{Cr}})$ к функции одного аргумента $F_A(h_{\mathrm{Cr}})$.

Полученное выражение (5) является уравнением пятого порядка относительно h_{Cr}. Согласно теореме Абеля–Руффини, алгебраические уравнения n-ой степени (при $n \geq 5$) в общем случае не имеют аналитического решения, так как не существует формул, которые давали бы возможность вычислить корни уравнения по его коэффициентам. Однако можно найти решения этого уравнения при помощи численных методов.

Подставляя возможные значения h'_{Cr} из диапазона 0–200 мкм в выражение (4) (зависимость на рисунке 4), получим множество значений силы притяжения $\{F_{A0_1}, F_{A0_2}, ..., F_{A0_i}\}$ магнита A к чистому никелевому покрытию. Исходя из значений полученного множества, необходимо рассчитать согласно выражению (3) или кривой на рисунке 6 возможные тангенсы угла наклона $k(F_{A0_i})$ для выражения (2) (номограмм на рисунке 5). Подставляя в выражение (2) результат измерения магнитом A отрывного усилия F_A, а также возможные значения тангенсов угла наклона $k(F_{A0_i})$ и начальные точки привязки F_{A0_i}, можно получить множество $\{h_{\mathrm{Cr}_1}, h_{\mathrm{Cr}_2}, \ldots, h_{\mathrm{Cr}_i}\}$ возможных толщин хромового покрытия в данной точке изделия.

За действительное значение толщины хромового покрытия h_{Cr} должно быть взято одно из значений полученного множества $\{h_{\mathrm{Cr}_1}, h_{\mathrm{Cr}_2}, \ldots, h_{\mathrm{Cr}_i}\}$, которое имеет наименьшее расхождение с одним из значений h'_{Cr_i} диапазона $\{h'_{\mathrm{Cr}_1}, h'_{\mathrm{Cr}_2}, ..., h'_{\mathrm{Cr}_i}\}$ реальных толщин хромового покрытия, которое использовалось для вычисления силы притяжения F_{A0_i} и, соответственно, h_{Cr_i}. Другими словами, за действительное значение h_{Cr} берется такое значение из множества $\{h_{\mathrm{Cr}_1}, h_{\mathrm{Cr}_2}, \ldots, h_{\mathrm{Cr}_i}\}$, для которого разность между h'_{Cr_i} и рассчитанным на его основе h_{Cr_i} стремится к нулю $|h'_{\mathrm{Cr}_i} - h_{\mathrm{Cr}_i}| \to 0$. На рисунке 7 представлены зависимости разностей $|h'_{\mathrm{Cr}_i} - h_{\mathrm{Cr}_i}|$ от толщины h_{Cr_i} для разных сочетаний толщин никелевого и хромового покрытий.

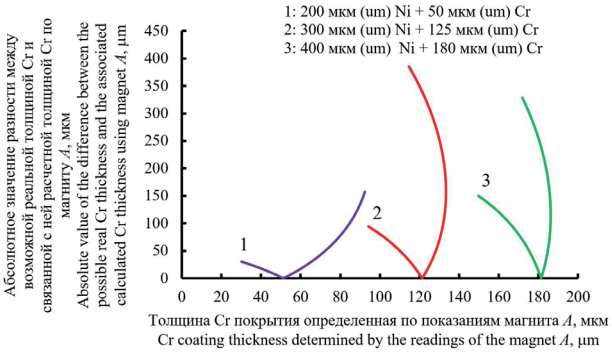

Рисунок 7 – Зависимость значения разности $|h'_{\mathrm{Cr}_i} - h_{\mathrm{Cr}_i}|$ между возможной реальной толщиной Cr h'_{Cr} и связанной с ней расчетной толщиной Cr по магниту A h_{Cr_i} от толщины h_{Cr_i}.

Figure 7 – Dependence of the absolute value of the difference between the possible real Cr thickness and the associated calculated Cr thickness using magnet A on the Cr thickness calculated using magnet A

Зная действительную толщину хромового покрытия в двухслойном никель-хромовом покрытии, нанесенном на немагнитное основание, возможно рассчитать действительное значение толщины никелевого покрытия. Т.е. исключить влияние толщины хромового покрытия на результат измерения толщины никелевого покрытия. Для этого необходимо на основании данных, представленных в виде графиков на рисунке 2, построить зависимость толщины никелевого покрытия от силы притяжения магнита B к двухслойной никель-хромовой структуре (рисунок 8). Т.е. каждому значению силы притяжения F_B магнита B, полученному на конкретной толщине никелевого покрытия h_{Ni} при наложении на него пленки-имитатора немагнитного хромового покрытия толщиной h_{Cr}, ставится в соответствие значение толщины этого никелевого покрытия h_{Ni}:

$$\begin{cases} F_{B1}(h_{\mathrm{Ni}1}, h_{\mathrm{Cr}1}) \to h_{\mathrm{Ni}1}, \\ F_{B2}(h_{\mathrm{Ni}2}, h_{\mathrm{Cr}1}) \to h_{\mathrm{Ni}2}, \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{\mathrm{Ni}n}, h_{\mathrm{Cr}1}) \to h_{\mathrm{Ni}n}; \end{cases} \begin{cases} F_{B1}(h_{\mathrm{Ni}1}, h_{\mathrm{Cr}2}) \to h_{\mathrm{Ni}1}, \\ F_{B2}(h_{\mathrm{Ni}2}, h_{\mathrm{Cr}2}) \to h_{\mathrm{Ni}2}, \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{\mathrm{Ni}n}, h_{\mathrm{Cr}2}) \to h_{\mathrm{Ni}n}; \end{cases} \ldots \begin{cases} F_{B1}(h_{\mathrm{Ni}1}, h_{\mathrm{Cr}m}) \to h_{\mathrm{Ni}1}, \\ F_{B2}(h_{\mathrm{Ni}2}, h_{\mathrm{Cr}m}) \to h_{\mathrm{Ni}2}, \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{\mathrm{Ni}n}, h_{\mathrm{Cr}m}) \to h_{\mathrm{Ni}n}. \end{cases}$$

Данные зависимости представляют собой множество кривых, каждая из которых соответствует определенной толщине хромового покрытия.

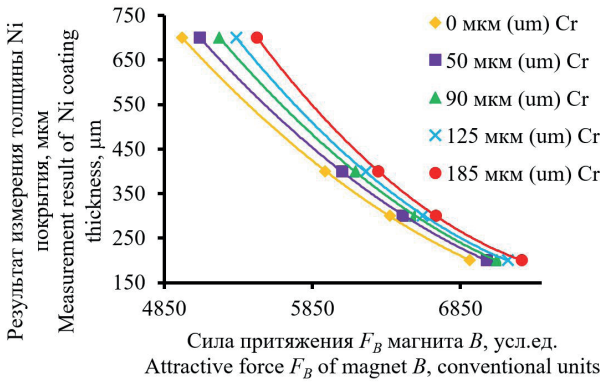

Рисунок 8 – Зависимость результата измерения толщины никелевого покрытия от силы притяжения F_B магнита B к двухслойной никель-хромовой структуре

Figure 8 – Dependence of the measurement result of Ni coating thickness on the attractive force F_B of magnet B to the double-layer nickel-chromium coating

Как видно из рисунка 8, одному значению силы притяжения магнита B к готовому изделию в конкретной точке контроля соответствует множество значений толщин никелевого покрытия в зависимости от толщины хромового покрытия, что дополнительно отражено на рисунке 9.

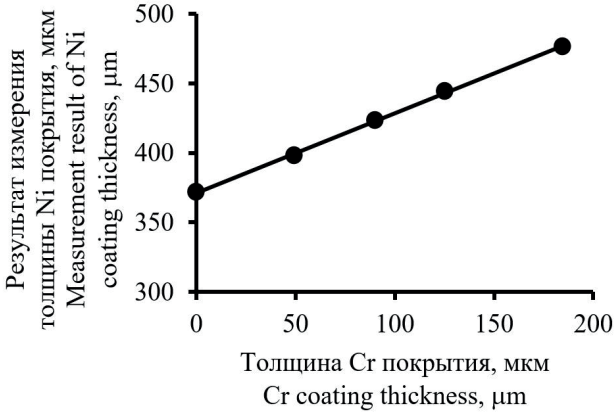

Рисунок 9 – Частная зависимость результата измерения толщины никелевого покрытия от толщины хромового покрытия для значения силы притяжения F_B магнита B (F_B = 6053 усл. ед.) к двухслойной никель-хромовой структуре в конкретной точке изделия

Figure 9 – Partial dependence of the measurement result of Ni coating thickness on the Cr coating thickness corresponding to the value of the attractive force F_B of magnet B (F_B = 6053 conventional units) to the double-layer nickel-chromium coating at a particular point of the product

Следовательно, определив действительную толщину хромового покрытия в заданной точке изделия по предложенной выше методике, можно, согласно рисунку 9, определить действительную толщину никелевого покрытия.

Заключение

Разработана методика, позволяющая неразрушающим способом определить толщины составляющих двухслойного никель-хромового покрытия, нанесенного на немагнитное основание, при одностороннем доступе к контролируемому изделию без априорных данных о свойствах или толщинах этих покрытий или изделия в целом. Методика заключается в получении двух результатов измерений F_A и F_B магнитоотрывного усилия двумя различными постоянными магнитами в заданной точке контроля, один из которых имеет высокую чувствительность к толщине никелевого покрытия (обладает большим полюсным расстоянием), а другой – к толщине хромового покрытия (характеризуется малым полюсным расстоянием). С использованием результатов измерений F_A и F_B осуществляется расчет искомых толщин покрытий из никеля и хрома по специальным предварительно полученным градировочным зависимостям для указанных магнитов.

Разработанная методика реализована в толщиномере двухслойных никель-хромовых покрытий ТЭП-ХН1, который успешно применяется предприятиями ракетно-космической отрасли Российской Федерации.

Список использованных источников

1. *Воробей, В.В.* Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В.В. Воробей, В.Е. Логинов. − М. : Изд-во МАИ, 2001. – 496 с.

2. *Ras, J.* Design of Liquid Propellant Rocket Engines / J. Ras. – LULU Press, 2016. – 412 с.

3. *Макаров, Ю.Н.* Актуальные проблемы неразрушающего контроля качества космической техники : монография / Ю.Н. Макаров, В.Е. Прохорович, А.И. Птушкин [и др.]. – СПб. : Альтеор, 2008. – 336 с.

4. *Schlesinger, M.* Modern Electroplating (5th Edition) / M. Schlesinger, M. Paunovic. – John Wiley & Sons, Inc, 2010. – 736 с. **doi**: 10.1002/9780470602638

5. *Blitz, J.* Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing / J. Blitz. – Springer Science & Business Media, 2012. – 261 с. **doi**: 10.1007/978-94-011-5818-3

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

7. *Лухвич, А.А.* Возможности магнитодинамического метода контроля толщины двухслойных покрытий / А.А. Лухвич, О.В. Булатов // Дефектоскопия. – 2008. – № 10. − С. 26−34.

8. *Рудницкий, В.А.* Определение толщины двухслойных никель-хромовых покрытий магнитным методом / В.А. Рудницкий, Е.В. Гнутенко, А. П. Крень // Метрология и приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 24–29.

9. *Ravaud, R.* Cylindrical magnets and coils: Fields, forces, and inductances / R. Ravaud, G. Lemarquand, S. Babic, V. Lemarquand, C. Akyel // IEEE Transactions on Magnetics.– 2010. – No. 46 (9). – P. 3585–3590. **doi**:10.1109/TMAG.2010.2049026

References

1. Vorobei V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* [Technology of the production of liquid-propellant rocket engines]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 2001, 496 p. (in Russian).

2. Ras J. Design of Liquid Propellant Rocket Engines. LULU Press, 2016, 412 p.

3. Makarov Y.N, Prohorovich V.E., Ptushkin A.I. *Aktual'nye problemy nerazrushayushchego kontrolya kachestva kosmicheskoi tekhniki* [Actual problems of non-destructive quality control of space technology]. St. Peterburg, Alteor Publ., 2008, 336 p. (in Russian).

4. Schlesinger M., Paunovic M. Modern Electroplating (5th Edition). John Wiley & Sons Inc., 2010, 736 p. **doi**: 10.1002/9780470602638

5. Blitz J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Springer Science & Business Media, 2012, 261 p. **doi**: 10.1007/978-94-011-5818-3

6. Potapov A.I., Syas'ko V.A. *Nerazrushayushchie metody i sredstva kontrolya tolshchiny pokrytii i izdelii* [Nondestructive Methods and Tools for Testing Thicknesses of Coatings and Products]. St. Petersburg, Gumanistika Publ., 2009, 904 p. (in Russian).

7. Luhvich A.A., Bulatov O.V. [The possibilities of the magnetodynamic method for controlling the thickness of double-layer coatings]. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], 2008, no. 10, pp. 26–34 (in Russian).

8. Rudnitsky V.A., Gnutenko E.V., Kren A.P. [Determination of the thickness of double-layer nickel-chromium coatings by magnetic method]. *Metrologiya i priborostroenie* [Metrology and instrument making], 2015, no. 4, pp. 24–29 (in Russian).

9. Ravaud, R., Lemarquand, G., Babic, S., Lemarquand, V., Akyel, C. Cylindrical magnets and coils: Fields, forces, and inductances. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, no. 46 (9), pp. 3585–3590. **doi**:10.1109/TMAG.2010.2049026