

УДК 620.179

## ТОЛЩИНОМЕТРИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДВУХСЛОЙНОГО НИКЕЛЬ-ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА НЕМАГНИТНОМ ОСНОВАНИИ МАГНИТООТРЫВНЫМ МЕТОДОМ

Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Характеристики и надежность современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) во многом определяются свойствами специальных покрытий, применяемых при их производстве. Одним из основных элементов любого ЖРД является камера сгорания (рис. 1). Для придания ей требуемых эксплуатационных свойств наиболее широкое применение нашло нанесение толсто-слойных никелевого (Ni) и хромового (Cr) покрытий. При этом главным параметром, определяющим способность покрытия после нанесения выполнять свою функцию, является его толщина и равномерность ее распределения.



Рисунок 1 – Структура многослойной стенки камеры сгорания ЖРД

Предложенная в [1] методика определения толщины хромового покрытия может использоваться только на стадии производства изделий ракетной техники, когда есть доступ к изделию до и после нанесения хромового покрытия на под-слой 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 [1], на готовом изделии оказывается либо невозможным, либо приводит к недопустимым погрешностям результатов измерений. Поэтому вопрос об определении толщин компонентов двухслойных никель-хромовых покрытий является достаточно важным и практически значимым.

Новый подход к решению поставленной задачи был разработан на основании использования физических закономерностей постоянных магнитов применительно к рассматриваемым двухслойным покрытиям, установленных в [1].

Предлагаемая методика основывается на использовании двух постоянных магнитов с различными полюсными расстояниями. При этом в обоих случаях постоянные магниты должны

иметь максимально возможное значение намагниченности. Исходя из этих требований в качестве материала для изготовления магнитов был использован NdFeB (неодим-железо-бор).

В результате анализа работы [1], магниты 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 (далее магнит А) должен иметь значительно меньшее полюсное расстояние, чем второй магнит (далее магнит Б). В нашем случае для магнита А полюсное расстояние составляло примерно 0.4 мм, а для магнита Б порядка 2 мм. Регулировка полюсного расстояния осуществлялась за счёт изменения радиуса сферического наконечника постоянного магнита.

Суть методики состоит в получении двух результатов измерений магнитоотрывного усилия  $F_A$  и  $F_B$  двумя магнитами А и Б в одной точке на готовом изделии и вычисления по полученным ранее зависимостям толщин никелевого и хромового покрытий. Отметим, что под магнитоотрывным усилием мы понимаем усилие (силу), которое необходимо приложить к магниту, чтобы оторвать его от ферромагнитной поверхности, равное силе притяжения магнита к этой поверхности.

Для вычисления толщин никелевого и хромового покрытий в первую очередь необходимо предварительно получить три основополагающие экспериментальные зависимости:

- силы притяжения  $F_{A0}$  магнита А к чистому никелевому покрытию от силы притяжения  $F_B$  магнита Б к двухслойной никель-хромовой структуре (рис.2);
- силы притяжения  $F_A$  магнита А от толщины хромового покрытия  $h_{Cr}$  (рис. 3);
- результата измерения толщины никелевого покрытия  $h_{Ni}$  от силы притяжения  $F_B$  магнита Б к двухслойной никель-хромовой структуре (рис.4).

Далее, на основании значения измеренного магнитоотрывного усилия  $F_B$  магнита Б и зависимости на рисунке 2 необходимо получить для данной точки изделия диапазон  $\{F_{A0.1}, F_{A0.2}, \dots, F_{A0.i}\}$  возможных значений силы притяжения магнита А к свободному от хрома никелевому покрытию, зависящий от реальной толщины хромового покрытия  $h'_{Cr}$ .

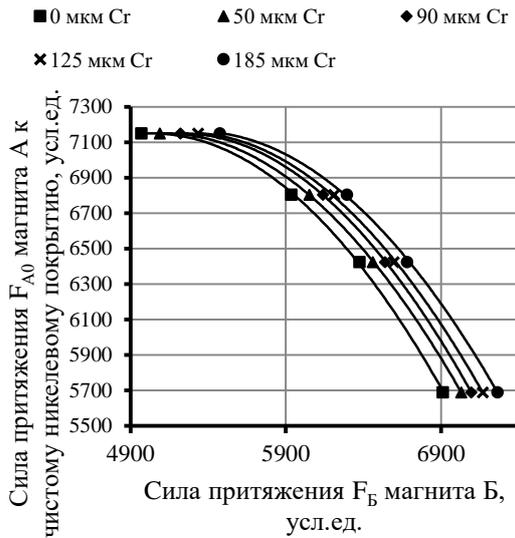


Рисунок 2 – Зависимость силы притяжения магнита А к чистому никелевому покрытию от силы притяжения магнита Б к двухслойной никель-хромовой структуре

Используя полученное множество  $\{F_{A0-1}, F_{A0-2}, \dots, F_{A0-i}\}$ , результат измерения магнитом А отрывного усилия  $F_A$  и зависимость на рисунке 3, получить по методике, изложенной в [1], множество  $\{h_{cr-1}, h_{cr-2}, \dots, h_{cr-i}\}$  возможных толщин хромового покрытия в данной точке изделия.

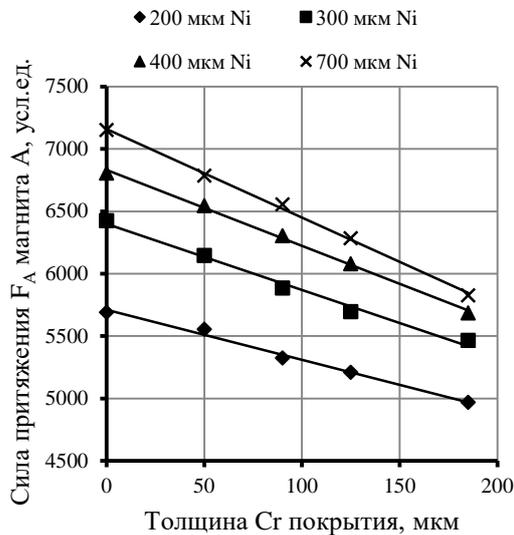


Рисунок 3 – Зависимость силы притяжения  $F_A$  магнита А от толщины хромового покрытия

За истинное значение толщины хромового покрытия  $h_{cr}$  надо принять одно из значений полученного множества  $\{h_{cr-1}, h_{cr-2}, \dots, h_{cr-i}\}$ , которое имеет наименьшее расхождение с одним

из значений  $h'_{cr-i}$  диапазона  $\{h'_{cr-1}, h'_{cr-2}, \dots, h'_{cr-i}\}$  реальных толщин хромового покрытия, которое использовалось для вычисления силы притяжения  $F_{A0-i}$  и, соответственно,  $h_{cr-i}$ :  $|h'_{cr-i} - h_{cr-i}| \rightarrow 0$ .

На основании данных об истинной толщине хромового покрытия  $h_{cr}$  и значении магнитоотрывного усилия  $F_B$  магнита Б, используя зависимость на рисунке 4, можно определить истинную толщину никелевого покрытия  $h_{Ni}$ .

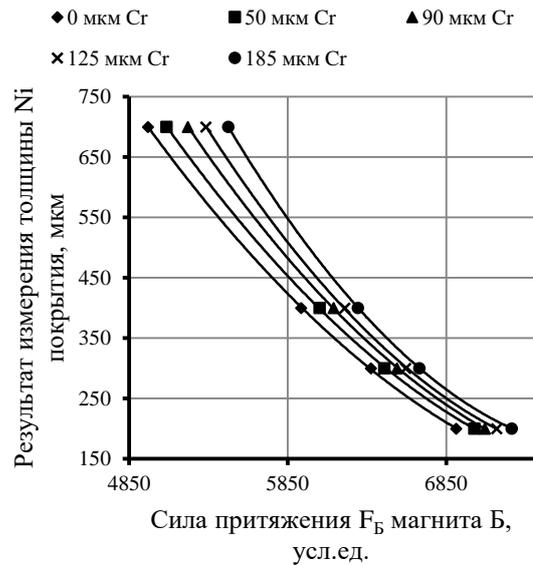


Рисунок 4 – Зависимость результата измерения толщины никелевого покрытия от силы притяжения магнита Б к двухслойной никель-хромовой структуре

Таким образом, предложена методика, позволяющая 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. Представленные результаты исследований были получены с помощью разработанного в ИПФ НАН Беларуси нового пондеромоторного толщиномера двухслойных никель-хромовых покрытий ТЭП-ХН1 с использованием образцов никелевых фольг четырех номиналов толщин (200 мкм, 300 мкм, 400 мкм и 700 мкм), а также четырех немагнитных пленок толщиной 50 мкм, 90 мкм, 125 мкм и 185 мкм, имитирующих хромовое покрытие.

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