

УДК 620.179.14

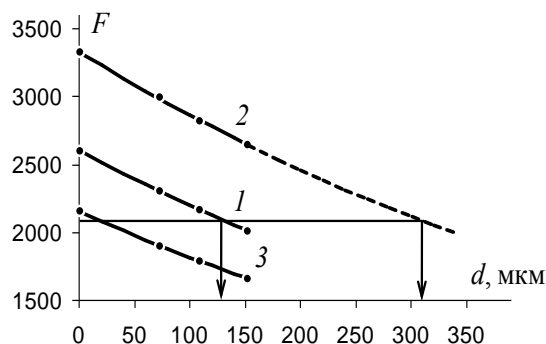
## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА НИКЕЛЕ

Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л.  
Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Задача контроля толщины хромовых покрытий на никелевых актуальна при производстве камер сгорания жидкостных ракетных двигателей. Требуется проводить измерения в диапазоне до 150 мкм при вариации толщины никеля под хромом в пределах от 200 до 700 мкм. В работах [1, 2] теоретически и экспериментально обоснована возможность решения этой задачи предложенным и развиваемым в ИПФ НАН Беларуси магнитодинамическим методом толщинометрии. Разработанные на его базе и сертифицированные в Российской Федерации (Государственный реестр средств измерений № 50930-12, свидетельство об утверждении типа средств измерений № 47796) приборы МТДП-1 предназначены для контроля толщины хромовых покрытий на никеле с основной погрешностью не более  $\pm 5\%$  [3, 4]. Результаты производственных испытаний этих приборов показали, что на практике имеет место обусловленная остаточной намагниченностью никеля дополнительная погрешность, которая значительно превышает основную. Экспериментально установлено, что снизить реальную погрешность измерений до приемлемого для практики уровня (не более  $\pm 10\%$ ) можно только при условии исключения либо минимизации влияния остаточной намагниченности никеля на информативный сигнал [5].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований взаимосвязи между уровнем остаточной намагниченности никеля, обусловленной технологическими факторами (сварка камеры сгорания, использование магнитных приборов при контроле толщины ее никелевого покрытия), и возможной погрешностью при толщинометрии хрома на никеле. Сущность проблемы состоит в том, что необходимую разрешающую способность обеспечивает магнитодинамический преобразователь, создающий слабое намагничивающее поле (энергия постоянного стержневого магнита такого преобразователя составляет порядка 15 мДж). В этом случае информативный сигнал является функцией толщины хрома, никеля, его структурного и магнитного состояний. Влияние на величину названного сигнала толщины никеля и его структурного состояния компенсируется методически по результатам измерений, полученным на никеле до нанесения хрома. Магнитное же состояние никеля учесть невозможно, даже если измерить уровень остаточной индукции над поверхностью

контролируемых участков камеры сгорания; следовательно, остается вариант размагничивания объема информативной зоны магнитодинамического преобразователя.



1 – кривая, соответствующая полностью размагниченному никелю, 2 – намагниченному постоянным стержневым магнитом с энергией  $\sim 180$  мДж в том же направлении, что и магнит преобразователя, 3 – в противоположном направлении

Рисунок 1 – Зависимость информативного сигнала  $F$  от толщины  $d$  хромового покрытия при разном магнитном состоянии никеля под хромом

Методика исследований состояла в проведении измерений на образцовой мере никелевого покрытия толщиной 361 мкм в одном из двух предельных состояний – никель полностью размагничен либо максимально намагничен стержневым магнитом с энергией порядка 180 мДж [5]. Для сравнения рассматривалось также промежуточное магнитное состояние. Размагничивание осуществлялось многовитковой катушкой, создававшей убывающее по амплитуде переменное поле; разный уровень намагниченности никеля формировался за счет совпадающих или противоположных по направлению полей магнита и преобразователя. Зависимость информативного сигнала от толщины хрома и остаточной намагниченности никеля под хромом приведена на рисунке 1.

Видно, что намагниченность никеля определяет положение кривой  $F = f(d)$ , оказывая этим значительное влияние на погрешность измерений. Так, сигналу  $F = 2100$  по исходной кривой 1 (ее следует рассматривать как градуировочную) соответствует толщина  $d = 127$  мкм; после приложения к никелю магнита в том случае, когда направления намагниченности никеля и магнита преобразователя совпадают, указанному

сигналу соответствует кривая 2, по которой  $d = 309,7$  мкм. Дополнительная погрешность составляет 144 %; что неприемлемо для практики. Более подробно оценить влияние остаточной намагниченности никеля на результаты измерений толщины хромовых покрытий можно по данным, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Информативный сигнал  $F$  и погрешность  $\Delta$  при проведении измерений на полностью размагниченом либо максимально намагниченом никеле

$d$ , мкм	Никель полностью размагничен		Никель намагничен в одинаковом с магнитом преобразователя направлении	
	$F$ , мкм	$\Delta$ , %	$F$ , мкм	$\Delta$ , %
48	48,8	1,7	235,7	391
71	70,7	-0,4	262,5	270
87	88,2	1,4	277,7	219
109	108,9	-0,1	301,3	176
125	122,8	-1,8	313,9	151
152	155,2	2,1	341,2	124

Видно, что когда никель полностью размагничен, погрешность измерений  $\Delta$  пренебрежимо мала, так как практически не выходит за пределы  $\pm 2$  %, при этом разброс ее значений имеет случайный характер. Если никель обладает максимальной остаточной намагниченностью, то уровень погрешности  $\Delta$  составляет от 125 % при максимальной толщине  $d$  до 390 % при  $d = 50$  мкм.

Рассмотренные выше результаты подтверждают зависимость погрешности измерений от уровня остаточной намагниченности никеля. Так как полное размагничивание камеры в условиях производства осуществлять очень трудно и по этой причине нецелесообразно, оптимальным следует считать проведение измерений при наличии внешнего магнитного поля, обеспечивающего в объеме информативной зоны преобразователя постоянное магнитное состояние никеля независимо от его магнитной предыстории (уровня и направления остаточной намагниченности). Возможны варианты импульсного намагничивания, размагничивания полем с убывающей амплитудой, однородного намагничивания постоянным полем.

В таблице 2 приведены данные, полученные в постоянном магнитном поле, приложенном к никелю, обладающему максимальной остаточной намагниченностью; они свидетельствуют о том, что в этом случае погрешность  $\Delta$  снижается до уровня, соответствующего основной погрешности приборов МТДП-1. Видно, что информативный сигнал  $F$  варьируется случайным образом, т. е. не зависит как от направления намагниченности никеля, так и от измеряемой толщины; этим также подтверждается высокая эффективность

предложенного подхода.

Таблица 2 – Данные, полученные в приложенном магнитном поле, обеспечивающем постоянное магнитное состояние никеля независимо от его остаточной намагниченности

$d$ , мкм	Направления намагниченности никеля и магнита преобразователя			
	совпадают		противоположные	
	$F$ , мкм	$\Delta$ , %	$F$ , мкм	$\Delta$ , %
48	49,9	4,0	47,7	-0,6
71	72,3	1,8	75,1	5,8
87	86,8	-0,2	85,2	-2,1
109	104,9	-3,8	111,8	2,6
125	127,1	1,7	122,9	-1,7
152	148,2	-2,5	146,0	-3,9

В настоящее время в рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» проводятся работы по созданию методики и средств контроля толщины хромовых покрытий на никеле, обеспечивающих исключение или минимизацию дополнительной погрешности, обусловленной остаточной намагниченностью никеля.

1. Лухвич А.А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины двухслойных покрытий / А.А. Лухвич, О.В. Булатов // Дефектоскопия. – 2008. – № 10. – С. 26–34.
2. Лухвич А.А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) / А.А. Лухвич, О.В. Булатов, А.Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 46–53.
3. Лукьянов А.Л. Магнитодинамический толщиномер двухслойных покрытий МТДП-1 / А.Л. Лукьянов, О.В. Булатов // Технология – оборудование – инструмент – качество: тезисы докладов Международной научно-технической конференции, Минск, 9–10 апреля 2014 г. – Минск: Бизнесофсет. – 2014. – С. 72–73.
4. Магнитный толщиномер двухслойных покрытий МТДП-1 // Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://iaph.basnet.by/VDev/mtdp1/mtdp1.html>. – Дата доступа: 30.07.2015.
5. Лухвич, А.А. Влияние остаточной намагниченности на результаты контроля магнитодинамическими толщиномерами специальных покрытий камер сгорания жидкостных ракетных двигателей / А.А. Лухвич, О.В. Булатов, А.Л. Лукьянов // Материалы Шестого Белорусского космического конгресса, Минск, 28–30 октября 2014 г.: в 2-х т. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси. – 2014. – Т. 1. – С. 58–61.