

УДК 620.179.14

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОТЖИГА ДЕФОРМИРОВАННОГО НИКЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Шарандо В.И., Чернышёв А.В., Кременькова Н.В.

*Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь*

Гальванические никелевые покрытия больших толщин на немагнитных (бронзовых) основаниях широко применяются в ракетной технике. В настоящее время освоен их контроль с помощью магнитодинамического метода [1], приборы такого рода были разработаны в ИПФ НАН Беларуси в процессе выполнения программ Союзного Государства «Космос-НТ» и «Мониторинг-СГ» [2, 3] и используются на соответствующих предприятиях. Исследования, проводившиеся в рамках указанных программ, выявили зависимость результатов контроля от условий нанесения и дальнейшего состояния никелевого покрытия; определяющее значение имеет уровень присутствующих в нём внутренних напряжений. Оценочные исследования показали, что величина измеренного толщиномером на гальванически осажждённом никеле сигнала соответствует его величинам при степенях деформации отожжённого никеля 15÷55 %. Термообработка покрытий может резко изменить показания приборов.

Целью работы являлось изучение возможностей получения информации, необходимой для оценки состояния никелевых покрытий при их производстве и создания методик снижения погрешностей их контроля.

Исследовано влияние температуры отжига деформированного никеля на показания приборов магнитодинамического и электромагнитного контроля. Использован толщиномер МТЦ-3-2 [1, 4], основанный на регистрации изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей стержневой магнит, при его контакте и затем удалении от ферромагнетика, в данном случае слоя никеля. Энергия магнита, выполненного из NdFeB, составляет 45 мДж. С помощью измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 [4], использующего устанавливаемую на поверхность ферромагнетика и затем удаляемую от него катушку без магнита, определялся поток индукции от магнитного пятна, оставленного преобразователем толщиномера МТЦ-3-2 после его снятия с поверхности никеля. Исследования при переменном магнитном поле возбуждения производились с помощью прибора ПКТ-2 [5]. Измерялась амплитуда третьей гармонической составляющей выходной ЭДС накладного преобразователя.

Ввиду затруднительности деформационной обработки находящихся на основаниях покрытий исследования проводились на пластинках из

используемого при их нанесении электролитического никеля, которые были начально отожжены на воздухе 3 часа при 700°C, прокатаны со степенью деформации 55 % до размеров 210×320×0,97 мм и снова подвергнуты часовому отжигу на воздухе при 200, 300, 400, 500 и 700°C.

Результаты измерений на них сигналов указанных выше приборов показаны на рисунке 1.

Из рисунка следует, что все три метода имеют высокую чувствительность к структурному состоянию никеля и могут быть использованы для исследований процессов его деформации и отжига. Поведение кривых полностью укладывается в представления, связанные с изменением в исследуемом материале концентрации структурных дефектов, в частности плотности дислокаций. При пластической деформации металла она возрастает, что для ферромагнетика приводит к уменьшению максимальной магнитной проницаемости и увеличению коэрцитивной силы. С первым фактором связано падение магнитного потока в намагничивающем поле (сигнал МТЦ-3-2), со вторым – рост остаточной намагниченности (сигнал ИОН-4). Отжиг дефектов металлической решётки с повышением температуры приводит к возврату этих параметров к состоянию, характерному для равновесной структуры. В случае электромагнитного контроля ввиду небольшой величины амплитуды поля возбуждения преобразователя перемагничивание никелевого образца под ним осуществляется в релейской области. Известно, что при этом амплитуда третьей гармонической составляющей магнитной индукции ферромагнитного образца прямо пропорциональна величине его коэффициента Релея, который, в свою очередь, обратно пропорционален плотности дислокаций [6]. Это и наблюдается в показаниях прибора ПКТ-2.

Существенное изменение измеряемых сигналов начинается после отжигов в районе 300°C, далее оно нарастает; основные изменения происходят до 500°C. Это означает, что при контроле толщины покрытий надёжные результаты могут быть получены только на никеле, не прошедшем термообработку или в случаях, когда температура его нагрева не превышала 200÷300°C. И если, как было отмечено, при наличии в материале покрытия внутренних напряжений, соответствующих степеням деформации 15÷55 %, с приемлемой погрешностью может быть применена единая градуировочная кривая, то после отжигов

при высоких температурах необходимо создавать применимые к новым структурам дополнительные градуировки приборов.

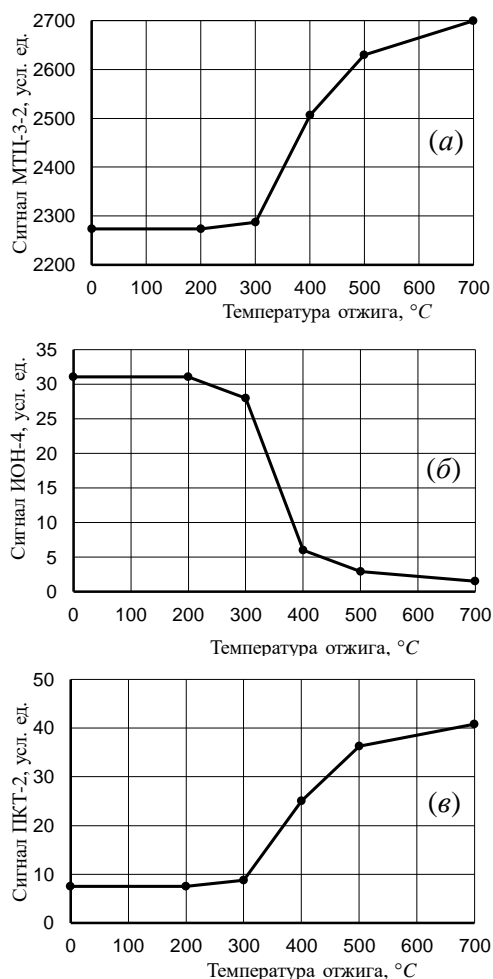


Рисунок 1 – Зависимость показаний приборов МТЦ-3-2 (а), ИОН-4 (б) и ПКТ-2 (в) от температуры отжига деформированных никелевых образцов

При температурах отжига более 500°C остаточная намагниченность становится близкой к нулевому значению, в то время как показания других приборов продолжают с замедлением нарастать. Это может быть связано как с менее интенсивным продолжением отжига сложных дефектов, так и с тем фактом, что процесс термообработки осуществлялся на воздухе. Вопрос, имеется ли в действительности выход кривых на насыщение при 700°C, корректно решён быть не может и в данном случае не является актуальным. На практике такие отжиги требуют использования инертных атмосфер или вакуума и, соответственно, изучения показаний приборов неразрушающего контроля применительно к изделиям, подвергнутым реальным технологиям термообра-

ботки. Это касается также рассмотрения эффектов, которые могут появиться при переходе от отдельных никелевых пластинок к реальным покрытиям на бронзовом основании в связи с возможной высокотемпературной диффузией атомов материала основания в никель и изменением его магнитных свойств.

Предложенные методы и методики контроля структурного состояния никеля и полученные в работе данные в дальнейшем могут быть использованы при анализе процессов деформации и отжига никелевых покрытий, создании градуировок для их промышленной толщинометрии. Из характера полученных зависимостей вытекает возможность как отдельного их использования, так и совместного рассмотрения для взаимной корректировки результатов.

атов осуществляемого вида неразрушающего контроля. Сюда может относиться и создание многофункциональных приборов контроля (толщиномеров покрытий), осуществляющих такую корректировку. Оценка преимуществ приборов друг перед другом может касаться только характеристик чувствительности и стабильности показаний и подверженности влиянию посторонних мешающих факторов. Здесь следует признать, что в качестве основного метода контроля следует использовать измерения с помощью прибора МТЦ-3-2, другие могут давать вспомогательную информацию.

#### Литература

1. Лухвич А.А. Магнитные толщиномеры нового поколения // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2010. – № 4. – С. 3–15.
2. Лухвич А.А., Булатов О.В. Магнитная толщинометрия специальных покрытий ракетных двигателей // *Четвертый Белорусский космический конгресс: материалы конгресса*, в 2 т., Минск, 27–29 октября 2009 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2009. – Т. 2. – С. 195–199.
3. Шарандо В.И., Кременькова Н.В., Булатов О.В., Лукьянов А.Л., Чернышев А.В., Сергеев О.С. Магнитодинамические и термоэлектрические приборы для измерения толщины покрытий изделий космической техники // *Материалы Седьмого Белорусского космического конгресса*, Минск, 24–26 октября 2017 г.: в 2-х т. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2017. – Т. 1. – С. 143–146.
4. Разработки лаборатории металлофизики ИПФ АН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс] // Режим доступа : <http://iaph.basnet.by/lab1/products/>. Дата доступа: 24.09.2019.
5. Гусак, Н.О. Прибор для контроля твердости ПКТ-2 / Н.О. Гусак, А.В. Чернышев, В.Л. Цукерман // *Дефектоскопия*. – 1991. – № 10. – С. 92.
6. Kronmüller, H. Statistical theory of Rayleigh's Law / H. Kronmüller // *Z. angew. Physik*. – 1970. – Vol. 30, no 1. – P. 9–13.