

вешенного) моста». Данные методы измерений широко описаны в литературе, например в [4].

Кроме того, в докладе даны рекомендации по организации и проведению работ связанных с калибровкой средств измерений температуры, использующих в качестве чувствительных элементов металлические болометры. Рекомендации могут быть использованы для описания методик (методов) калибровки, организации рабочих мест для проведения калибровки, а также для подготовки нормативно-технической документации по калибровке указанных средств измерения температуры.

УДК 620.179.142

ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ

Крень А.П., Гнутенко Е.В., Кутепов А.Ю., Протасеня Т.А.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Обоснована возможность применения магнитного пондеромоторного метода для оценки качества нанесения толстослойных никелевых покрытий на детали и сборочные единицы космической техники. Основными определяемыми показателями качества выступают толщина покрытия и равномерность распределения внутренних напряжений.

Ключевые слова: внутреннее напряжение, контроль, никелевые покрытия, магнитный пондеромоторный метод.

ESTIMATION OF THICKNESS AND INTERNAL STRESS IN NICKEL COATINGS

Kren A., Hnutzenka Y., Kutsepau A., Pratasenia T.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The possibility of using the magnetic ponderomotive method for assessing the quality of deposition of thick-layer nickel coatings on parts and assembly units of space technology has been substantiated. The main determinable indicators of quality are the thickness of the coating and the uniformity of the distribution of internal stresses.

Key words: internal stress, control, nickel plating, magnetic ponderomotive method.

*Адрес для переписки: Протасеня Т.А., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: 5657397@gmail.com*

В настоящее время нанесение различных функциональных покрытий на поверхность деталей и сборочных единиц космической техники с целью придания им требуемых свойств является одной из важнейших операций для обеспечения их надежной работы. Одними из основных показателей качества покрытий являются такие характеристики, как толщина (непосредственно влияет на массогабаритные характеристики) и наличие внутренних напряжений (которые могут привести к разрушению покрытия). В этой связи разработка современной аппаратуры и технологии контроля толщины и оценки распределения напряжений в таких специальных покрытиях, как толстослойные никелевые, обладающих улучшенными коррозионными, теплозащитными и износостойкими свойствами, представляется весьма актуальной задачей.

Литература

1. Волков, Ю. В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / Ю. В. Волков. – СПб : ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 89 с.
2. Датчики: справочное пособие / В. М. Шарапов [и др.]. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
3. Дивин, А. Г. Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин : учебное пособие / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов : Издательство ФБГОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 116 с.
4. Измерительная техника. Электрорадиоизмерения : учебное пособие / Заневский, Д.В. [и др.]. – Минск : ВА РБ, 2013. – 159 с.

Влияние различных технологических факторов (температуры, скорости прокачки электролита и др.) при оценке качества нанесения покрытий можно условно свести к одному показателю магнитных свойств (например, магнитной проницаемости), поскольку все они изменяют внутренние напряжения в покрытии, которые, в свою очередь, оказывают влияние на магнитные свойства. В тоже время известно [1], что наиболее сильное влияние внутренних напряжений на магнитные свойства металлов наблюдается в слабых магнитных полях, уменьшаясь при воздействии сильных полей. Поэтому наиболее приемлемыми методами контроля толщины никелевых покрытий являются методы, в которых используются сильные поля, а оценку изменения напряженного состояния наиболее оптимально проводить в полях малой величины.

Создание таких полей намагничивающими катушками является нецелесообразным вследствие их значительных габаритов, а также невозможности использования в портативной измерительной аппаратуре. В качестве источника больших полей можно использовать постоянные магниты, созданные на основе редкоземельных материалов и имеющие коэрцитивную силу порядка нескольких сотен А/м, а при определенном удалении магнита от объекта контроля или изменении его полюсного расстояния можно получить слабые поля. Реализовать схему контроля, основанную на данных положениях, можно с использованием пондеромоторного метода, информативным параметром для которого становится сила отрыва (притяжения) магнита от никелевого покрытия.

Для получения соотношений, связывающих отрывную силу магнита с толщиной и магнитными характеристиками никелевого слоя, будем считать магнит стержнем, в котором магнитные заряды сосредоточены у полюсов. Его межполюсное расстояние во много раз превышает толщину измеряемых покрытий, следовательно, взаимодействием удаленного полюса с покрытием можно пренебречь. В этом случае сила взаимодействия F (нормальная к поверхности составляющая силы взаимодействия) будет пропорциональна (с коэффициентом c) полю в точке расположения ближнего полюса магнита от индуцированных магнитных зарядов на поверхностях никелевого слоя (рис. 1).

$$F = cH_z \quad (1)$$

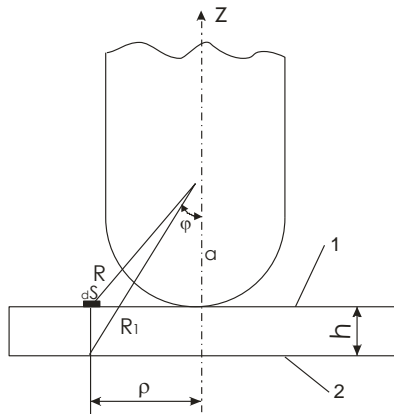


Рисунок 1 – Схема к выводу отрывной силы магнита

Поле H_z равно векторной сумме полей H_1 и H_2 , создаваемых противоположно заряженными поверхностями 1 и 2 никелевого покрытия. Принимая, что элементарные магнитные заряды $I dS$ (I – намагниченность) на поверхностях 1 и 2 для одинаковых ρ равны по величине и противоположны по знаку для $h \ll R$ получим исходя из (1):

$$F = c \left[\int_{S_1} \frac{aI}{R^3} dS - \int_{S_2} \frac{(a+h)I}{(R+h \cos \varphi)^3} dS \right], \quad (2)$$

где первое слагаемое соответствует полю от поверхности 1, а второе – от поверхности 2. Обозначения в уравнении (2) приведены на рис. 1.

Используя положения [1] и ряд допущений можно получить, что в первом приближении:

$$F = ck_T h \int_S \frac{H_e(3a^2 - R^2)}{R^5} dS, \quad (3)$$

или

$$F = c_1 k_T h. \quad (4)$$

Магнитная восприимчивость тела k_T в уравнении (4) связана с магнитной восприимчивостью материала k соотношением [1]:

$$k_T = \frac{k}{1 + Nk}. \quad (5)$$

Из (4) следует, что отрывная сила определяется двумя факторами: толщиной покрытия и магнитной восприимчивостью материала покрытия (размагничивающий фактор N связан только с толщиной покрытия). Поэтому судить по отрывной силе однозначно о толщине покрытия можно только при $k = const$. При этом известно [2, 3], что для гальванических покрытий, в частности никелевых, характерны макро- и микронапряжения, величина которых сильно зависит от условий осаждения, небольшие изменения в которых могут изменять даже знак напряжений [4]. Для оценки влияния макронапряжений σ и микронапряжений σ_i на магнитную восприимчивость можно воспользоваться формулой [4]

$$k = \frac{2 \mu_0 I^2}{9 \lambda_S \sigma_i} \left[1 - \frac{1}{5} \frac{\sigma}{\sigma_i} \right], \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, λ_S – коэффициент магнитоstriction.

Формулы (4) и (6) справедливы, если исследуемый материал находится не в состоянии магнитного насыщения. Об этом можно судить по величине внутреннего поля, которая может быть определена по известной формуле

$$H_i = H_e \left(1 - \frac{Nk}{1 + Nk} \right). \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что внутреннее поле H_i растет при заданном внешнем H_e с уменьшением Nk .

Размагничивающий фактор N тонкой магнитной пленки в сильно неоднородном внешнем магнитном поле постоянного магнита определить практически невозможно, но из общих соображений ясно, что он должен быть близок к единице [5]. Подставляя (6) в (4), получим:

$$F = \frac{c_1 h}{\frac{9\lambda_s \bar{\sigma}_l}{2\mu_0 I_s^2 \left(1 - \frac{\sigma}{5\bar{\sigma}_l}\right)} + N} \quad (8)$$

Полученные результаты показывают, что при использовании магнитного пондеромоторного метода существует возможность, как точного измерения толщины гальванических никелевых покрытий, так и оценки наличия внутренних напряжений. Если сопоставлять магнитный пондеромоторный метод с другими методами, то его преимущество заключается в том, что информацию о толщине и напряжениях дает в основном участок покрытия, непосредственно прилегающий к точке контакта магнита с изделием. На практике это обуславливает высокую локальность контроля при сохранении высокой точности измерений. Данные теоретические положения позволили разработать соот-

ветствующую технологию контроля и измерительную аппаратуру.

Литература

1. Аркадьев, В. К. Электромагнитные процессы в металлах / В. К. Аркадьев. – М. : ОНТИ, 1935. – 230 с.
2. Исследование химического состава плазменных покрытий из никель-керамической порошковой смеси / В. В. Иванцовский [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении, 2017. – Т. 4, № 2. – С. 35–39.
3. Интенсификация процессов получения функциональных покрытий медь, никель-фосфор в условиях нестационарного тока / К. А. Сагдеев [и др.] // Совершенствование технологии гальванических покрытий. – Киров, 1989. – С.13–14.
4. Вонсовский, С. В. Ферромагнетизм / С. В. Вонсовский, Я. С. Шур. – М. : ОГИЗ, 1948. – 816 с.
5. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М. : «Наука», 1971. – 1032 с.

УДК 519.2:006

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кулуев Р.Р.

*Ташкентский государственный технический университет им. И.А. Каримова
Ташкент, Республика Узбекистан*

Аннотация. Проанализирована современная технология выпечки хлебобулочных изделий и анализ способов (методов) проведения выпечки хлеба. Установлены достоинства и недостатки методов выпечки, в результате которого установлено, что для проведения измерения влажности по известным методам затрачивается более 45 минут и лишняя электроэнергия и др. Разработано устройство для измерения влажности хлеба в потоке. Предложенный метод и устройство позволяет провести измерения влажности хлеба в течение не более 2–3 минуты и облегчает труд операторов, а также экономит электрическую энергию, повысить точность и чувствительность.

Ключевые слова: влажность, измерение, сыпучие материалы, зерно, контроль.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A DEVICE FOR CONTINUOUS CONTROL OF MOISTURE IN BULK MATERIALS

Kuluyev R.

*Tashkent State Technical University named after I.A. Karimov
Tashkent, Uzbekistan*

Abstract. The modern technology of baking bakery products and the analysis of methods (methods) of carrying out bread baking are analyzed. The advantages and disadvantages of baking methods have been established, as a result of which it has been established that it takes more than 45 minutes to measure moisture according to known methods and extra electricity, etc. A device has been developed for measuring the moisture content of bread in a stream. The proposed method and device makes it possible to measure the moisture content of bread for no more than 2-3 minutes and facilitates the work of operators, as well as to save electrical energy, improve accuracy and sensitivity.

Key words: moisture, measurement, bulk materials, grain, control.

*Адрес для переписки: Кулуев Р.Р., г. Ташкент, Республика Узбекистан
e-mail: ruslan-kuluyev@mail.ru*

Анализ известных работ по контролю влажности зернопродуктов показал, что имеется много разработок по контролю влажности зерна и других сыпучих материалов.[1–3] Изучение выпечки зернопродуктов показали, что все они вы-

пекаются в стационарных условиях. После выпечки, кроме хлеба, все остальные хлебобулочные изделия снимаются вместе с посудами и после охлаждения упаковываются в коробки, а хлеб, после выпечки в горячем виде поставляется на прод-