

Приведенные данные свидетельствуют о том, что сплав ВТ41М обеспечивает высокую жаропрочность при мелкозернистой глобулярно-пластинчатой микроструктуре и по комплексу свойств не уступает зарубежному аналогу, превосходя серийный сплав ВТ18У.

В отожженном состоянии благодаря переходу на микродуплексную микроструктуру и наличию относительно большого количества β -фазы материал прутка обладает высокой пластичностью, которая сохраняется при длительных выдержках при максимальной рабочей температуре (см. также [5]). Дополнительно повысить прочность материала позволяет применение термоупрочняющей термической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, USA. 1992. P. 439–445.
2. Development and evaluation of high temperature titanium alloy IMI 834. N.F. Neal, IMI Titanium limited, GB. Sixth world conference on titanium, France. 1988. P. 253–258.
3. Хэммонд К., Наттинг Дж. Металловедение жаропрочных и титановых сплавов /Труды международной конференции. Хоулдсворт, 1977.– М.: Metallurgia. 1982. С. 89–101.
4. Sai K.V. Srinadh, Singh Nidhi, Singh V. Role of Ti_3Al /silicides on tensile properties of Timetal 834 at various temperatures: Indian Academy of Sciences. //Mater. Sci. 2007. V. 30. №6. С. 595–600.
5. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Исследование термической стабильности прутка из сплава ВТ41 после различных режимов термической обработки //МиТОМ. 2010. № 8.
6. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Жаропрочные титановые сплавы.– М.: Metallurgia. 1976. С. 220.
7. Baby S., Kowmudi B. Nagaraja, Omprakash C.M., Satyanarayana D.V.V., Balasubramaniamb K., Kumar V. Creep damage assessment in titanium alloy using a nonlinear ultrasonic technique. //Scripta materialia. 2008. V. 59. P. 818–821.

УДК 669.295

Н.А. Ночовная, Д.В. Сиваков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ РАЗЛИЧНОГО ФАЗОВОГО СОСТАВА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Разработана математическая модель, описывающая зависимость электропроводности твердого раствора титана с кислородом с учетом предельной растворимости кислорода в титане и диффузионного распределения. Произведен расчет уравнения для плоской электромагнитной волны для математической модели титанового сплава. Получена зависимость напряженности магнитного поля в поверхностном слое титана и определено влияние наводимых кольцевых (вихревых) токов на параметры возбуждающей катушки индуктивности для титанового сплава с различным фазовым составом и концентрацией кислорода.

Ключевые слова: титановый сплав, электромагнитное поле, уравнение электромагнитного поля, решение уравнения электромагнитного поля численным методом.

Глубина альфированного (газонасыщенного) слоя (ГНС) может быть определена методом измерения микротвердости, рентгеновским методом и металлографическим методом (по изменению микроструктуры поверхностного слоя) [1].

Достаточно надежным является измерение глубины газонасыщенного слоя на титановых сплавах методом микротвердости. За глубину газонасыщенного слоя принимают расстояние от поверхности, при котором повышение твердости из-за растворения кислорода равно ошибке измерения. Измерение микротвердости альфированного

слоя производится на полированных микрошлифах, вырезанных из исследуемого изделия таким образом, чтобы плоскость шлифа была расположена перпендикулярно или под малым углом (косой шлиф) к исследуемой поверхности.

Измерение глубины газонасыщенного слоя рентгеновским методом основано на определении степени (глубины) дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке сплава, т. е. определении величины полупоглощающего слоя. В зависимости от того, какие рентгеновские дифракционные линии присутствуют на рентгенограмме, делают вывод о фазовом составе. При увеличении содержания кислорода в титане повышается степень искажения его решетки, что обуславливается увеличением параметра решетки.

Альфированный слой отличается по структуре от основного металла повышенным содержанием α -фазы, что легко оценивается металлографическим анализом, часто этот слой представлен одной α -фазой. Однако изменение микроструктуры в поверхностном слое в результате газонасыщения обнаруживается у сплавов с двухфазной структурой только после длительного нагрева при температурах выше 600°C .

Все существующие методы контроля относятся к разрушающим, так как требуют изготовления шлифов, – следовательно, невозможно осуществить 100%-ный контроль изделий. Эти методы сравнительно сложны и трудоемки.

В связи с этим для повышения надежности эксплуатации и ремонта авиационных материалов [2] требуется разработать метод неразрушающего контроля. Предложен метод, называемый методом электромагнитной структуроскопии, основанный на взаимодействии катушки индуктивности и проводящей контролируемой среды. Физический принцип метода заключается в появлении вихревых токов под поверхностью контролируемого материала, глубина проникновения которых зависит от электрофизических параметров материала и частоты тока, питающего катушку.

Для расчета оценочных значений электропроводности титанового сплава с наличием и без альфированного слоя необходимо обратиться к информации о влиянии концентрации кислорода в титановом сплаве на значение удельного электросопротивления [1] (удельная электропроводность является обратной величиной электросопротивления).

Логарифмическая зависимость электропроводности от содержания кислорода в титане (в атомн. %) представлена на рис. 1.

Полученная зависимость электропроводности от содержания кислорода в титане позволит рассчитать глубину проникновения магнитного поля (с учетом изменений значения удельной электропроводности).

На основе классических формул [3] построим график для значения глубины проникновения от частоты питающего тока (рис. 2) для случая с альфированным слоем при концентрации кислорода 25% и без альфированного слоя.

Анализируя полученное распределение можно сделать ряд выводов:

- область на графике однозначно определяет частотный диапазон в соответствии с требуемой точностью оценки ГНС;
- определенный частотный диапазон будет являться краевым условием решения задачи оценки ГНС;
- определенный частотный диапазон будет являться исходным условием при расчете параметров вихретокового преобразователя.

При расчете электрофизических параметров альфированного слоя в титановом сплаве необходимо использовать математическую модель, описывающую физические процессы внутри титанового сплава. Математическая модель необходима для расчета глубины проникновения магнитного поля в титановый сплав.

Для построения математической модели необходимо выдвинуть ряд требований, удовлетворение которых обязательно для разрабатываемой модели:

- модель должна иметь ряд входных параметров и один выходной параметр, являющийся значением электропроводности;
- модель должна быть представлена в виде математической функции, необходимой для расчетов глубины проникновения;
- модель должна учитывать оксидный и газонасыщенный слои, их толщину.



Рис. 1. Зависимость электропроводности от содержания кислорода в титане

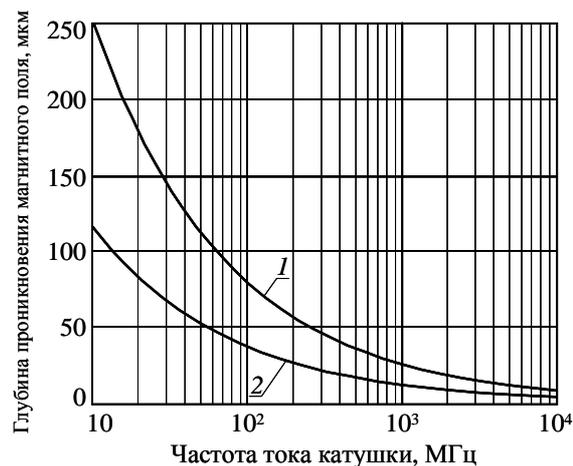


Рис. 2. График распределения глубины проникновения тока от частоты для титана с альфированным слоем при концентрации кислорода 25% (1) и без альфированного слоя (2)

Для создания математической модели воспользуемся принципами грубого абстрагирования (модель «черного ящика») и определим все входные и выходные параметры, включая мешающие и случайные факторы. На рис. 3 представлена система «черного ящика» с указанными параметрами.



Рис. 3. Абстрагированная математическая модель приповерхностной области титанового сплава с альфированным слоем с учетом принципов моделирования «черного ящика» с указанными направлениями входных и выходных параметров

Определим группу входных параметров в соответствии со структурными особенностями приповерхностной области титанового сплава с учетом оксидного слоя.

Параметры оксидного слоя:

- значение электропроводности оксидного слоя;
- протяженность оксидного слоя.

Параметры газонасыщенного слоя титанового $(\alpha+\beta)$ -сплава для α -фазы:

- значение основной электропроводности;
- параметр экспоненциального распределения.

Параметры газонасыщенного слоя титанового $(\alpha+\beta)$ -сплава для β -фазы:

- значение основной электропроводности;
- параметр экспоненциального распределения.

Выборка фазы по процентному содержанию ($\alpha+\beta$)-фазы:

– функция сортировки по процентному соотношению α - и β -фазы для сплава.

Для выбора мешающих факторов заложим функцию наложения шумовой помехи с нормальным распределением в диапазоне выходных значений на максимальном уровне 0,5% от значения для каждой точки.

На рис. 4 показана функциональная связь между блоками – функциями для каждого из перечисленных входных параметров. В результате суммирования и наложения шума на выходе будет наблюдаться зависимость электропроводности (средней) от расстояния от поверхности в глубь материала (рис. 5).

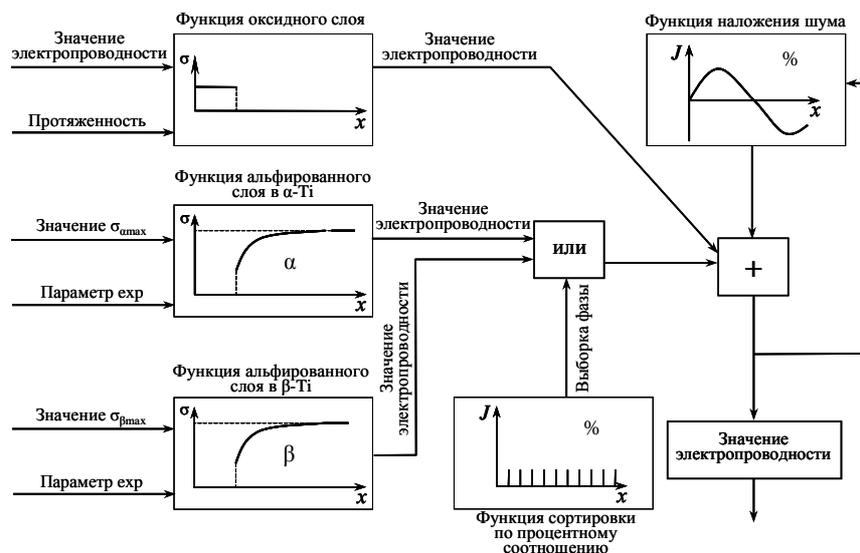


Рис. 4. Функциональная схема работы математической модели

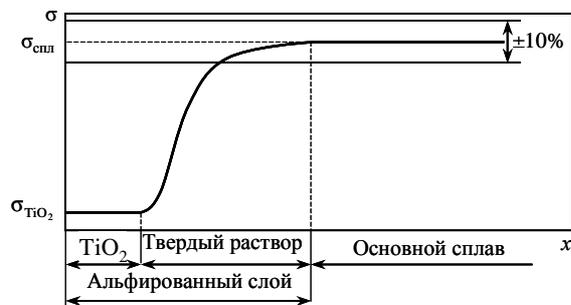


Рис. 5. Усредненная функция зависимости электропроводности (σ) титанового сплава с наличием газонасыщенного и оксидного слоев (x – расстояние от поверхности)

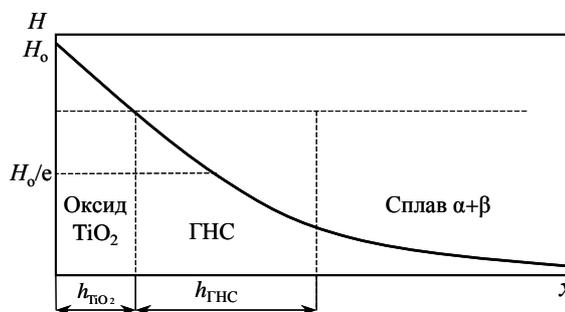


Рис. 6. Схематическая зависимость напряженности магнитного поля от глубины его проникновения в титановый сплав (участок с наибольшей крутизной расположен в области перехода оксидного слоя в газонасыщенный)

На рис. 5 представлена зависимость электропроводности, разделенная на три области, для каждой из которых имеется своя функциональная зависимость.

В результате построения математической модели становится возможным математически зафиксировать [4] описанную выше модель. Аналитическая оценка глубины

проникновения показана на рис. 6, где участок с наибольшей крутизной затухания напряженности магнитного поля должен находиться в области перехода оксидного слоя в газонасыщенный [6].

Для последующих исследований зависимостей спектров тока и напряжения преобразователя от значения глубины ГНС и для разработки технологии их определения были изготовлены образцы из титановых сплавов ВТ8-1 и ВТ6.

Изготовление образцов из сплавов ВТ8-1 и ВТ6 с заданными характеристиками ГНС производилось путем термообработки в воздушной среде при различной продолжительности экспозиции.

Образцы из титанового сплава ВТ8-1 (двух различных плавок) были подвергнуты термообработке в воздушной среде при температуре 600°C с выдержкой 0; 5; 10; 15; 20; 25 и 30 ч.

Измерение микротвердости производилось на микротвердомере ПМТ-3М в соответствии с ПИ 1.2.665–2003 «Определение величины газонасыщенного (альфированного) слоя на полуфабрикатах и изделиях из титановых сплавов», определение толщины ГНС – при помощи металлографического анализа на микроскопе «Versamet» (инструкция ВИАМ №1054–76).

ГНС обладает повышенной по сравнению с основным сплавом микротвердостью. Толщина ГНС определялась путем пошагового (от поверхности к сердцевине) измерения микротвердости шлифа с установлением положения зоны перехода.

Полученные характеристики (микротвердость и толщина ГНС) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры образцов из титанового сплава ВТ8-1

Условный номер партии и образца	Время экспозиции при 600°C, ч	Толщина ГНС, мкм	Микротвердость H_{μ} , МПа
1 – 01	0	Без ГНС (исходная)	3480–3570
1 – 11	5	3	3860–3960
1 – 22	10	5	4120–3640
1 – 31	15	6	3600–3470
1 – 42	20	7	3600–3420
1 – 53	25	8	3880–3510
1 – 71	30	10	3370–3500
2 – 02	0	Без ГНС (исходная)	3480–3570
2 – 11	5	3	3540–3230
2 – 23	10	5	3550–3640
2 – 41	20	6	3620–3220
2 – 52	25	7	3750–3670

Изготовление образцов из сплава ВТ6 с заданными характеристиками ГНС производилось путем термообработки в воздушной среде при температуре 600°C с продолжительностью экспозиции 1; 7; 15; 25 и 50 ч – по два образца для каждой экспозиции.

Из полученных образцов (по одному из каждой пары) были изготовлены микрошлифы для определения микротвердости. Полученные значения микротвердости и глубины ГНС представлены в табл. 2.

Значения микротвердости и ГНС образцов из сплава ВТ6

Условный номер образца	Экспозиция при 600°C, ч	Точка измерения	$H_{ц}$, МПа (среднее значение)	Толщина ГНС, мкм
1	1	Сердцевина	1790	Без ГНС (исходная)
		Зона перехода	1850	
		Край	1870	
2	7	Сердцевина	1800	1–3
		Зона перехода	1750	
		Край	3800	
3	15	Сердцевина	1850	5
		Зона перехода	1800	
		Край	1980	
4	25	Сердцевина	1940	10
		Зона перехода	2360	
		Край	3170	
5	50	Сердцевина	1760	15
		Зона перехода	2300	
		Край	3610	

Для исследования образцов с заданными характеристиками ГНС и уточнения частотного диапазона исследования спектров вихретокового преобразователя, проведены теоретические расчеты по определению глубины проникновения магнитного поля в титановый сплав (на примере ВТ8-1). Для нахождения теоретической зависимости было решено численным методом уравнение Максвелла – дифференциальное уравнение второго порядка с зависимой правой частью с использованием построенной математической модели $\sigma(x)$ и выбранной круговой частоты. Теоретическая зависимость представлена на рис. 7 (кривая 1).

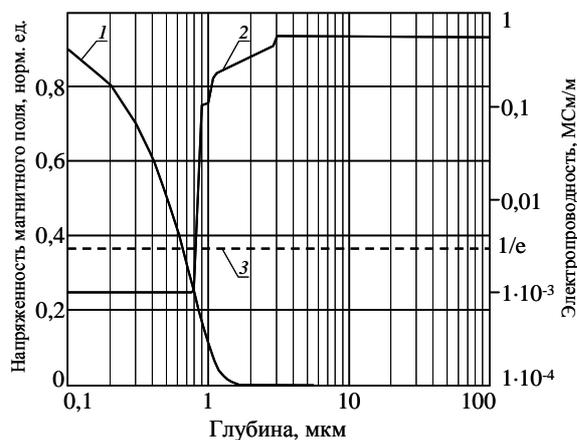


Рис. 7. Теоретическая зависимость для образца из сплава ВТ8-1 (с ГНС 3 мкм):

1 – относительной напряженности магнитного поля от расстояния от поверхности при частоте 25 МГц; 2 – электропроводности от расстояния от поверхности; 3 – уровень напряженности магнитного поля, сниженной в «e» раз (относительно исходной)

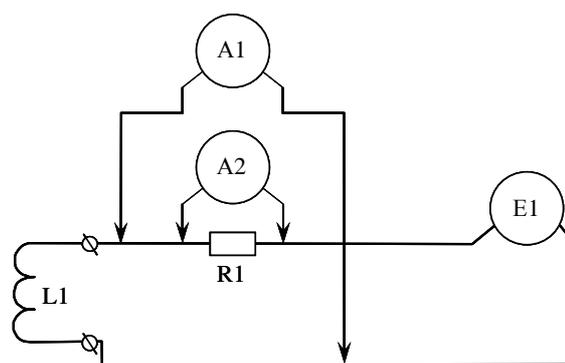


Рис. 8. Схема подключения вихретокового преобразователя:

E1 – генератор сигналов; A1 и A2 – каналы аналого-цифрового преобразователя; R1 – нагрузочное сопротивление; L1 – катушка индуктивности (вихретоковый преобразователь)

На основе построенной теоретической зависимости проведено исследование глубин проникновения и определены значения для образцов с газонасыщенными слоями 3; 5; 6; 7; 8 и 10 мкм. В результате исследования определено, что глубина проникновения не зависит от увеличения толщины ГНС более 3 мкм и составляет 0,65 мкм. Данное значение представлено на рис. 7 как пересечение кривой 1 и прямой 3.

Таким образом, определено, что при частоте 25 МГц возможно определение толщины ГНС размером 3 мкм, но для повышения чувствительности лучше использовать следующие более высокочастотные гармоники. На основе теоретических исследований определено, что малые значения (до 5 мкм) ГНС необходимо определять на гармониках от 50 до 100 МГц, а большие (от 5 мкм и более) на частотах от 25 до 50 МГц.

Для экспериментального подтверждения теоретических расчетов был изготовлен макет вихретокового преобразователя, произведен расчет электрических параметров (индуктивность катушки и сопротивление цепи) для диапазона частот от 1 до 100 МГц.

Для проведения опробования макета вихретокового преобразователя был собран стенд на основе генератора сигналов произвольной формы Е1 (ГСПФ-053-USB) и двухканального аналого-цифрового преобразователя с каналами А1 и А2 (ЛА-н4-USB); собранный стенд подключен к преобразователю по схеме, указанной на рис. 8.

Канал А1 используется для определения падения напряжения (ЭДС) вихретокового преобразователя, а канал А2 – для определения тока в цепи вихретокового преобразователя на нагрузочном сопротивлении $R1$. В результате проведенных исследований было определено наличие четырех резонансных пиков в собственном спектре при частотах: 25; 50; 75 и 100 МГц.

С использованием изготовленного макета проведено исследование зависимости спектров токов и напряжения (ЭДС) макета мультимчастотного вихретокового преобразователя от толщины ГНС образцов в диапазоне частот 0,5–100 МГц. Установлено, что изменение спектральных характеристик (амплитуды) токов и напряжений является незначительным в данном диапазоне частот. Однако полученные спектры позволяют учесть шумы. Мультимчастотный вихретоковый преобразователь в исследуемом диапазоне частот обладает резонансом токов. С учетом полученных данных в качестве информативного параметра использовано отношение напряжения (ЭДС) к току преобразователя, которое представляет собой значение комплексного сопротивления для каждой частоты ($\bar{Z}=\bar{U}/\bar{I}$).

Для определения модуля комплексного сопротивления (отношения спектров напряжения (ЭДС) к спектрам токов) преобразователя, для каждого из образцов синхронно зарегистрированы и исследованы спектры напряжений (ЭДС) и токов. При этом произведен расчет модуля комплексного сопротивления преобразователя в исследуемом диапазоне частот. В результате проведенных исследований получен набор спектров модуля комплексного сопротивления преобразователя для каждого из образцов. Анализ полученных спектров производился разностным способом, т. е. исследовалась разница между спектром исходного образца (без ГНС) и спектром образца с заданной характеристикой (толщиной) ГНС. Собственный спектр преобразователя представлен на рис. 9.

Результаты исследований спектров модулей комплексного сопротивления представлены на рис. 10, 11 и 12.

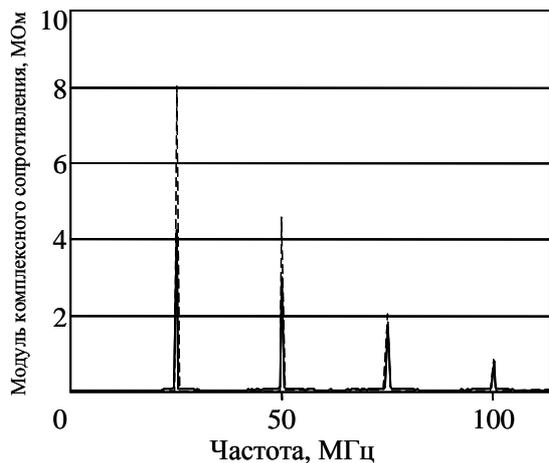


Рис. 9. Собственный спектр комплексного сопротивления вихретокового преобразователя

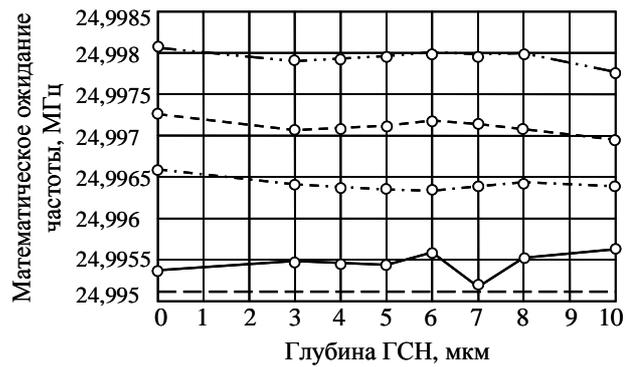


Рис. 10. Зависимость математического ожидания от глубины ГСН для образцов из сплава VT8-1 (— · —; - - -; - · - значения 2, 3 и 4 пика резонансной частоты в спектре комплексного сопротивления вихретокового преобразователя (см. рис. 9) → приведены к основному резонансу (—))

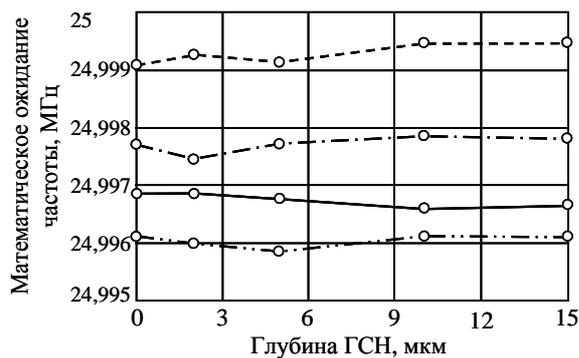


Рис. 11. Зависимость математического ожидания от глубины ГСН для образцов из сплава VT6 (— · —; - - -; - · - значения 2, 3 и 4 пика резонансной частоты в спектре комплексного сопротивления вихретокового преобразователя (см. рис. 9) → приведены к основному резонансу (—))

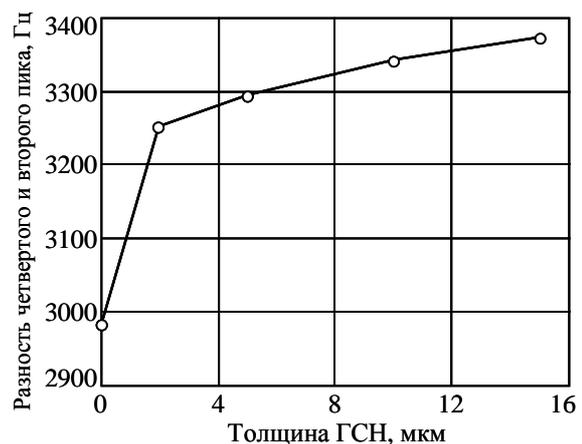


Рис. 12. Зависимость приведенных разностей математического ожидания 4 и 2 резонансных пиков резонансной частоты в спектре комплексного сопротивления вихретокового преобразователя (см. рис. 9) от глубины ГСН для образцов из титанового сплава

Представленная на рис. 9 зависимость была получена для тестовых образцов из сплава VT8-1 с заданными толщинами ГСН: 2; 5; 10 и 15 мкм.

Можно охарактеризовать следующие стадии определения толщины ГСН:

- определение значений собственных резонансных пиков вихретокового преобразователя;
- определение значений резонансных пиков для тестовых образцов из исследуемого титанового сплава с известной толщиной ГСН;

- построение зависимости изменения значений для каждой из резонансных частот от толщины ГНС тестовых образцов;
- для полученных приведенных зависимостей, определение такой разности, результатом которой будет монотонная зависимость изменения данной разности от толщины ГНС тестовых образцов (см. рис. 12);
- исследование образца из такого же титанового сплава с неизвестным значением толщины ГНС, определение значения резонансных пиков и соотнесение их с полученной монотонной зависимостью.

В итоге можно сделать ряд выводов:

- предложен способ неразрушающего контроля толщины газонасыщенного слоя методом электромагнитной структуроскопии;
- представлена математическая модель титанового сплава с газонасыщенным и оксидным слоем;
- экспериментально доказано существование корреляционной зависимости на ряде резонансных частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С.П., Брун М.Я. Титановые сплавы. Металловедение титана и его сплавов.– М.: Металлургия. 1992. 352 с.
2. Чечулин Б.Б., Разуваева В.Н. Титановые сплавы в машиностроении.– Л.: Машиностроение. 1977. 248 с.
3. Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник.– М.: Машиностроение. 1995. 488 с.
4. Тихонов А.Н. К математическому обоснованию теории электромагнитных зондирований //Вычислительная математика и математическая физика. 1965. Т. 5. №3. С. 545–547.
5. Солонина А.И., Улахович Д.А. Основы цифровой обработки сигналов: Учеб. пособие.– СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 453 с.
6. Ярмольчук Г.Г. Бесконтактный метод определения удельного электрического сопротивления //Автоматика и телемеханика. 1958. № 3. 65 с.

УДК 678.7

И.Н. Гуляев, Г.М. Гуняев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ АРМИРУЮЩИХ ВОЛОКОН В КАЧЕСТВЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Показаны пути разработки и использования непрерывных (протяженностью, соответствующей размеру детали или контролируемого участка) тензочувствительных сенсорных элементов на основе армирующих углеродных и металлизированных арамидных волокон, позволяющих связать уровень деформаций с уровнем напряжений, возникающих в ответственных деталях или в труднодоступных участках конструкции из композиционного материала.

Ключевые слова: интеллектуальные материалы, углепластики, органопластики, сенсорные элементы, тензорезисторы.

Для различного рода исследований и оценки упруго-прочностных характеристик в материале и/или конструкции применяют традиционные дискретные тензорезисторные