Контроль и диагностика поверхностных слоев и покрытий. Тенденции и перспективы

Венгринович Валерий Львович

Заведующий лабораторией вычислительной диагностики Института прикладной физики НАН Беларуси, д. т. н. Академик Международной Академии НК (AINDT) и Российской Академии электротехнических наук, Лауреат Международной премии Баркгаузена (Dresden Barkhausen Award), 2008 г., Лауреат премии НАН Беларуси, 2007 г.
III уровень по магнитному виду НК.

Введение

Ввиду своего расположения поверхностный слой в материале находится в особом состоянии и обладает свойствами, часто отличными от свойств основного материала. Общие причины такого состояния хорошо известны:

• ослабленное состояние межатомных связей;

• взаимодействие с окружающей средой, характеризующейся окислительными, восстановительными, наводораживающими или другими свойствами;

• наличие дефектов обработки: механической, термической, лучевой, радиационной или другой;

• сегрегация примесей и дефектов, как в случае усталости металла или износа;

• наличие зон концентрации растягивающих напряжений, как в случае шлифовочных прижогов и др.

Поэтому поверхность материалов всегда является предметом особой заботы разработчиков изделий и конструкций. Конструктивные и экономические аргументы сводятся к необходимости обеспечения, по крайней мере, равнопрочности и равнозначности свойств материала поверхности и основного материала. Это достигается двумя принципиальными способами: нанесением покрытий или специальной обработкой поверхности. Технологии нанесения и обработки давно превратились в самостоятельную индустрию, преследующую цель улучшения эксплуатационных свойств изделий за счет придания их поверхностным слоям особых свойств прочности, сопротивления износу, окислительным процессам и усталости, обеспечения термостойкости, радиаци-

онной и коррозионной стойкости, способности поглощать или отражать излучение определенных длин волн и т. д., вплоть до придания изделиям обеззараживающих или бактерицидных свойств.

Важнейшими компонентами индустрии обработки поверхности являются методы диагностики поверхностных слоев и покрытий, определение их геометрических, физических и химических характеристик методами НК. Понятно, что ни один метод обработки или нанесения не является полноценным без разработки технологии и средств измерения или оценки всего комплекса свойств слоев и покрытий: толщины, твердости, напряжения, химического состава, оптических характеристик, теплопроводности, шероховатости, сопротивления усталости и износу, наличия дефектов сплошности и др. В арсенале специалистов по диагностике поверхностных слоев (ДПС) сегодня находятся приборы и методы НК: магнитный, вихретоковый, ультразвуковой, радиационный, тепловой, магнитных шумов, СВЧ, оптический, зондовая микроскопия и др.

Насколько известно автору, одним из первых приборов для контроля покрытий, поставленных на серийное производство, был магнитный толщиномер Акулова (МТА) (рис. 1), основанный на принципе пондеромоторного взаимодействия постоянного магнита и ферромагнитного материала основы. С его помощью можно с точностью до нескольких микрон измерять толщины немагнитных материалов (меди, олова, цинка, хрома, титана) на стали, толщины и свойства ферромагнитных никелевых покрытий на различной основе, содержание ферромагнитной α-фазы в нержавеющей стали и др. Прибор имел полное метрологическое обеспечение, включая методики аттестации, поверки и измерения, а также комплектовался набором поверочных и контрольных образцов. Несмотря на то, что прибор был запатентован во всем мире и поставлен на производство в 1963 г., до сих пор ни один прибор этого класса не может конкурировать с ним по точности, простоте пользования, надежности и портативности.

Рис. 1. Магнитный толщиномер Акулова

За прошедшее время вместе с появлением большого числа методов нанесения слоев и обработки поверхности усложнились и требования

к средствам ДПС. Возникла необходимость измерять слои толщиной от нанометров (нано-слои) до нескольких миллиметров (плакированные слои), параметры многослойных покрытий, слоев, обработанных концентрированными (лазерными, плазменными) источниками тепла, диагностировать покрытия из новых материалов (например, графены), свойства покрытий и слоев с разрешением по глубине (например, после поверхностной пластической деформации (ППД)), выявлять наноразмерные дефекты покрытий и многое другое.

На рынке сегодня предлагается большое количество неразрушающих и мало-повреждающих приборов для ДПС и покрытий: вихретоковых, ультразвуковых, магнитных, СВЧ, микро-рентген-спектральных и др. Набор измеряемых параметров обычно ограничен толщиной, твердостью и химическим составом. Настоящая статья не ставит себе целью описание всех существующих методов ДПС. В ней сделана попытка изложить лишь некоторые, с точки зрения автора, значимые тенденции развития ДПС и некоторые ближайшие перспективы этого развития.

Диагностика покрытий и слоев с разрешением по глубине. Многослойные покрытия

Диагностика покрытий и слоев с разрешением по глубине или послойный анализ ПС в математической постановке относится к классу существенно некорректных обратных задач. Впервые в таком виде эта задача была сформулирована в [1, 2] применительно к послойному анализу упрочненных слоев ферромагнитных материалов методом магнитных шумов в следующем виде:

$$v(y) = \int_0^\infty \varphi\{x, y, \sigma(x)\} e^{-\alpha(y)x} dx, \qquad (1)$$

где $v(y)$ — эффективное напряжение шума Баркгаузена в накладном преобразователе, зависящее от варьируемого в процессе эксперимента параметра y (например, ток перемагничивания или частота анализа); $\varphi\{x, y, \sigma(x)\}$ — вклад слоя в сигнал; $\sigma(x)$ — контролируемый параметр, зависящий от глубины x; $\alpha(y)$ — коэффициент затухания магнитного шума в ферромагнетике, который в общем случае зависит от параметра y. Если реконструируемой функцией является распределение внутренних напряжений по глубине (после ППД), $\alpha(x)$, то задача реконструкции напряжений с разрешением по глубине может быть представлена в виде следующего интегрального уравнения:

$$\tilde{v}(i) = \int_0^f \sigma(x) e^{-\alpha(i)x} dx, \qquad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой математически некорректное уравнение Фредгольма 1-го рода и может быть решено традиционным методом регуляризации Тихонова [3]. На основе этого подхода в ИПФ НАНБ был разработан программно-аппаратный комплекс INTROMAT для промышленной реализации послойного анализа упругих напряжений на поверхности изделий, подвергнутых ППД.

На рис. 2 приведены профили напряжений $\sigma(x)$, полученные для образцов стали 30ХГСНА после ППД по измеренным данным $v(i)$ в результате решения уравнения (2). Для сравнения здесь же приведены эпюры напряжений на тех же образцах, измеренные независимым разрушающим методом Давыденкова. Видно, что оба метода имеют хорошее соответствие. При этом погрешность, которую обеспечивает метод реконструкции, не превышает 20%, что достаточно для многих прикладных задач.

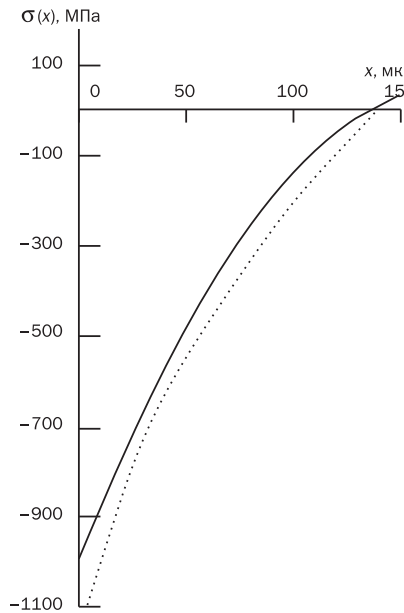

Рис. 2. Профили напряжений $\sigma(x)$, полученные для образцов из стали 30ХГСНА в результате решения уравнения (2) (пунктирная линия) и измеренные методом Давыденкова (сплошная линия) [2]

В основе послойного анализа ферромагнетиков лежит сильная зависимость магнитных характеристик от напряжений или других свойств ПС. Значительно сложнее ситуация с немагнитными проводящими материалами, у которых проводимость очень слабо зависит от напряжений. Для большинства конструкционных материалов эти изменения не превосходят 3% во всем диапазоне упругости. В этом случае используют связь частотных спектров с напряжениями. Американскими исследователями разработаны методы обращения спектров вихретоковых сигналов для реконструкции функции изменения напряжений с разрешением по глубине. Проблема исключительно актуальна для космической и авиационной

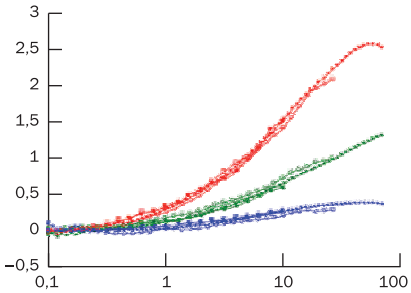

Рис. 3. АЕСС* спектры в инконеле IN718 для обработанных ППД образцов с различными величинами числа Альмена, изготовленных в различных лабораториях США [4]

промышленности, где практически все несущие элементы подвергаются поверхностному упрочнению методами ППД. На рис. 3 показаны для примера спектры мнимой составляющей поверхностной проводимости (Apparent Eddy Current Conductivity, АЕСС) для образцов из инконеля [4]. Как видно, в широком диапазоне частот спектральные характеристики меняются всего на 2,5%. Поэтому требуется высокая точность измерения проводимости в процессе контроля. На рис. 4 приведены результаты реконструкции функции послойного распределения напряжений, полученные путем обращения АЕСС спектров упрощенным и итерационным способами соответственно.

Необходимость решения обратной задачи (без ограничения способа решения) для реконструкции послойного распределения свойств ПС в дальнейшем была независимо подтверждена и развита во многих рабо-

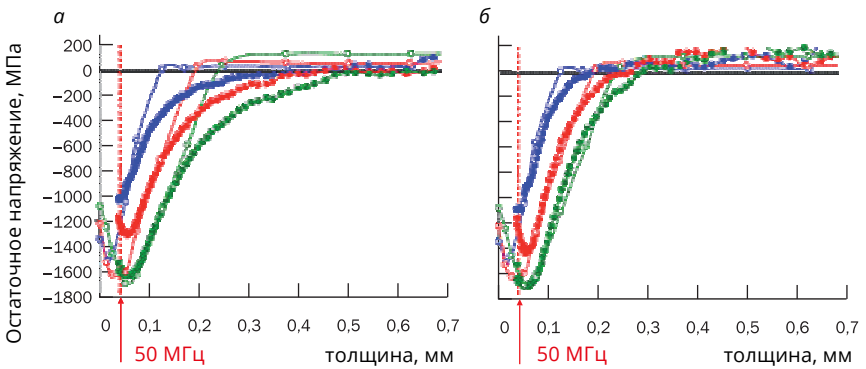

Рис. 4. Результаты реконструкции послойного распределения напряжений в образцах инконеля, изготовленных в различных лабораториях США [4], с различными величинами числа Альмена: *а* — упрощенным методом; *б* — итерационным. Точками показаны результаты прямых измерений напряжения

* — AECC change — Change of Apparent Eddy Current Conductivity — Изменение мнимой составляющей поверхностной вихретоковой проводимости (пер. автора)

Обедненная β-фазой зона 2 (Al_2O_3)	**Наименование образца**	**Расположение покрытия**	**Наименование покрытия**	**Средняя толщина (микроны)**	**Вычисленная толщина (микроны)**
	1950F-1000 циклов (Голубой 4)	Вехняя сторона	Внутренняя диффузия	25,8	26,4
Алюминид — β-фаза Алюминид			Внутренний, обедненный на бета-фазу, слой	34,0	33,0
			Зона бета-фазы	62,6	63,8
Обедненная β-фазой зона 1			Наружный, обедненный на бета-фазу, слой	37,5	41,5
		Нижняя сторона	Внутренняя диффузия	23,7	25,0
Зона взаимной диффузии			Внутренний, обедненный на бета-фазу, слой	38,1	40,1
			Зона бета-фазы	52,6	53,0
Подложка из GTD-11			Наружный, обедненный на бета-фазу, слой	33,2	34,8

Рис. 5. Состав четырехслойного покрытия тепловой защиты шаттла США и результаты реконструкции толщин четырех слоев покрытия и сравнение их с измеренными значениями [7]

тах. Применение методов обращения данных для исследования свойств ПС было успешно использовано, например, для магнитного [5, 6], вихретокового [7] и ультразвукового [8] методов. Список может быть многократно расширен. Один из наиболее успешных результатов применения обратных задач описан в ряде работ Г. Саббаха для решения проблемы реконструкции свойств многослойных покрытий тепловой защиты шатлов (рис. 5) вихретоковым методом. Слева показаны составы слоев, а справа приведены результаты реконструкции их толщин. Послойный анализ реализован также в рамках теплового, рентгеновского и СВЧ методов.

Магнитные меандровые магнетометры, MWM

Магнитные меандровые магнетометры (MWM™), созданные в Массачусетском технологическом институте (США), — это плоские гибкие пленочные вихретоковые сенсоры для исследования свойств по-

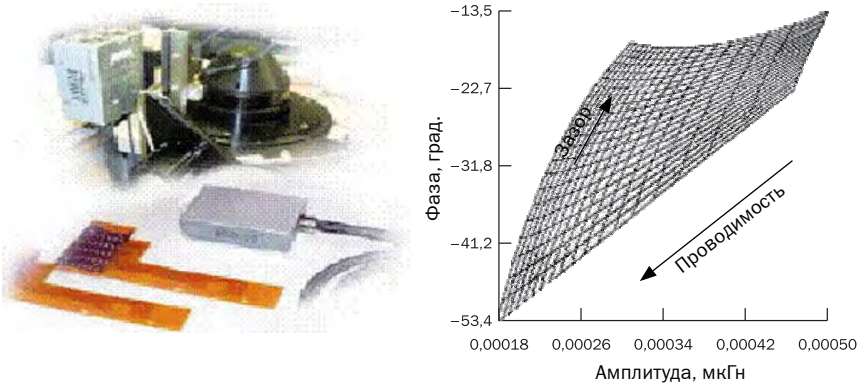

Рис. 6. Слева — MWM сенсоры и измерительная аппаратура. Справа — четырехпараметровые грид-диаграммы, позволяющие инвертировать измеряемые значения электромагнитного импеданса в значения электрической проводимости [9–11]

верхностных слоев проводящих материалов [9–11]. Уникальность новой технологии состоит также в использовании так называемых грид-диаграмм, по существу, годографических четырехпараметровых диаграмм, позволяющих инвертировать измеряемые значения амплитуды и фазы электромагнитного импеданса в значения электрической проводимости или магнитной проницаемости (рис. 6). Применяемые вплоть до температур 120 °C, MWM сенсоры изготавливаются на тонкой гибкой основе, в результате чего они адаптируются почти к любой поверхности. Информативная глубина зависит от частоты возбуждения и меняется в диапазоне от долей микрона до нескольких долей миллиметра. Сенсоры, производимые с помощью планарных технологий, обеспечивают отличную воспроизводимость и разрешающую способность. MWM сенсоры и MWM-матрицы калибруются на воздухе, что позволяет использовать их в качестве высокоточных измерителей абсолютных значений проводимости. Аппаратура позволяет производить параллельный опрос всех элементов матрицы, избегая мультиплексирования и во много раз ускоряя измерительную процедуру, а также позволяя цветную визуализацию измеренных значений проводимости одновременно на больших поверхностях. Разработчик технологии — компания JENTEK — решила большое число прикладных задач по исследованию и диагностике поверхностных слоев.

На рис. 7 показано распределение нормализованной магнитной проницаемости на поверхности малолегированной стальной пластины

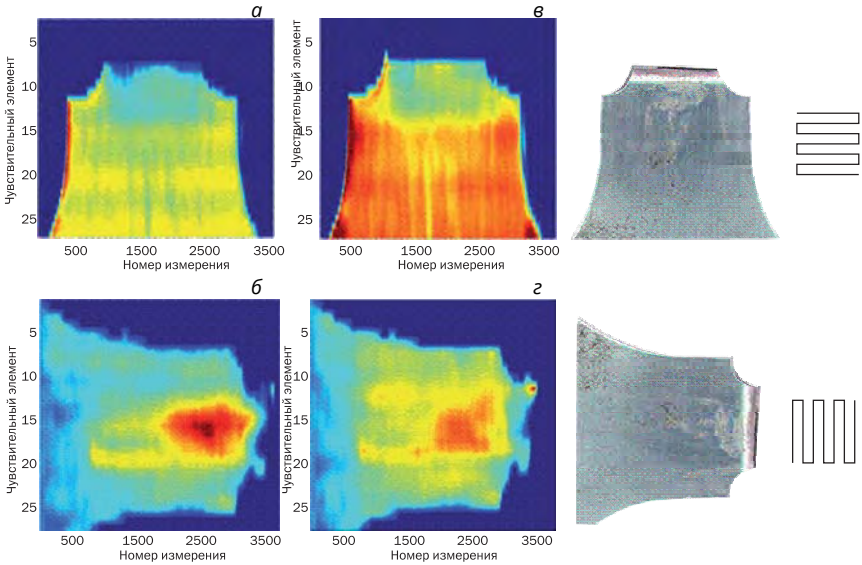

Рис. 7. Распределение нормализованной магнитной проницаемости на поверхности малолегированной стальной пластины в процессе ее деформации растяжением до разрушения. Изображения получены MWM матрицей на частоте 1 МГц (а, б) и 158 кГц (в, г). Ориентации витков по отношению к образцам показаны справа [12]

в процессе ее деформации растяжением до разрушения. Изображения получены MWM матрицей на разных частотах [12]. Ориентации витков по отношению к образцам показаны справа. Подобные изображения электрической проводимости на разных частотах получают для любых поверхностных слоев в проводящих материалах.

Контроль поверхностных слоев, упрочненных концентрированными источниками тепла

Ориентация машиностроительных производств на расширенное использование различных видов поверхностных упрочняющих технологий, в частности, концентрированными источниками тепла (лазерными, электронно-лучевыми и плазменными) требует высокочувствительных средств контроля. Впервые этот вопрос рассмотрен в [13, 14]. Эффективность этой технологии в дальнейшем неоднократно подтверждалась. При использовании этого, а также любых других методов, важнейшими остаются вопросы локальности и толщина информативного слоя преобразователя, чувствительность метода к структуре материала

и внутренним напряжениям с разрешением по глубине, селективность по отношению к другим влияющим факторам. Как было показано в работе [15], магнитные шумы в наибольшей степени удовлетворяют этим требованиям. Ход фазовых превращений при больших скоростях нагрева (при лазерном нагреве они достигают сотен тысяч град/с) резко отличается от того, который имеет место при медленном нагреве: критический интервал превращений (рекристаллизация, фазовая перекристаллизация) смещается в область высоких температур пропорционально корню квадратному из скорости нагрева. Поэтому даже при температурах, близких к температуре плавления, обычные гетерогенные диффузионные процессы могут не реализоваться, а, значит, структура упрочненных слоев и их толщина определяются не только фронтом температуропроводности. Поэтому косвенный контроль тепловыми методами по температуре в данном случае неприемлем. Большие трудности при контроле возникают из-за нестабильности условий закалки (мощность излучения, скорость сканирования, удельное тепловложение, диаметр светового пятна, расфокусировка, краевые эффекты), степени однородности исходной структуры, флуктуаций коэффициента поглощения из-за различий состояния поверхности (коррозия, окалина, загрязнения, повреждения). Все это предъявляет специфические требования к методу контроля.

Для повышения разрешающей способности метода контроля необходимо уменьшать диаметр преобразователя. На рис. 8 представлены результаты сканирования преобразователем Баркгаузена (профилограммы) диаметром d = 6,5 мм поперек дорожек лазерно-упрочненных слоев (ЛУС) в стали У10 при различных отношениях l/d, где l = 16 мм — ширина дорожки ЛУС (намагничивание вдоль ЛУС). Видно, что только при отношении $l/d > 2{,}5$ удается с достаточной точностью определить ширину дорожки, тогда как фактическая глубина может быть достоверно измерена при $l/d > 1$.

Следует сказать и о возможности определения донного профиля ЛУС при сканировании. На рис. 8 снизу показаны 5 профилограмм относительной величины интенсивности магнитного шума поперек дорожки ЛУС после последовательного электролитического травления поверхности. Достоверность воспроизведения донного профиля значительно возрастает при уменьшении толщины ЛУС.

Аналогичные проблемы возникают также при сходных способах воздействия на поверхность, в результате которых возникают поверх-

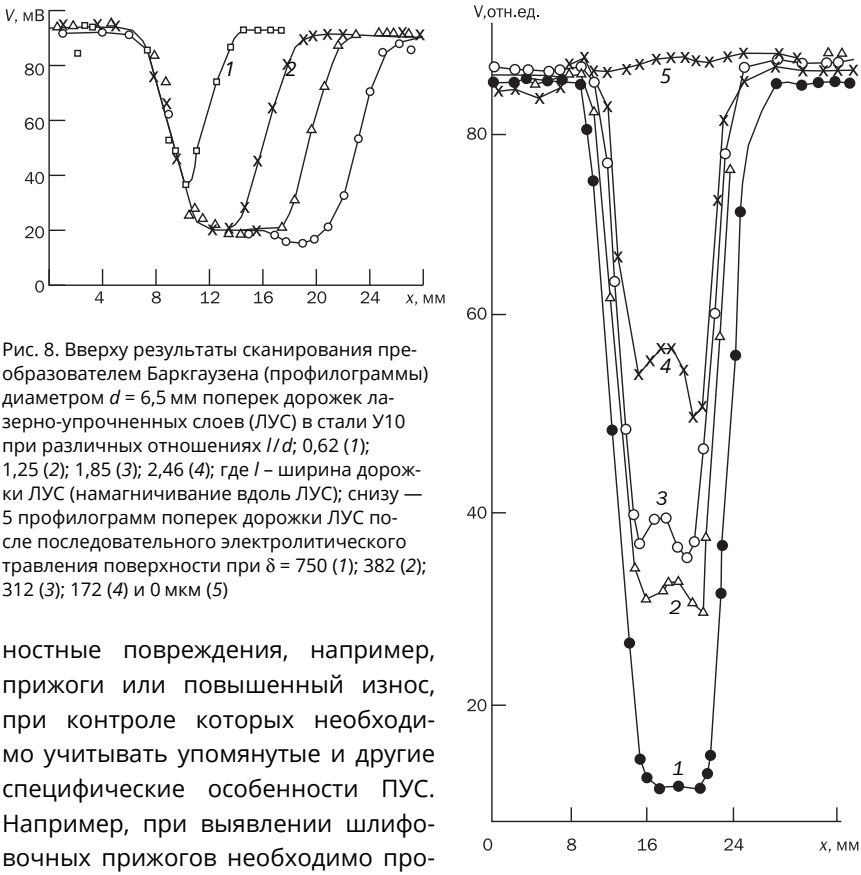

Рис. 8. Вверху результаты сканирования преобразователем Баркгаузена (профилограммы) диаметром d = 6,5 мм поперек дорожек лазерно-упрочненных слоев (ЛУС) в стали У10 при различных отношениях l/d; 0,62 (*1*); 1,25 (*2*); 1,85 (*3*); 2,46 (*4*); где l – ширина дорожки ЛУС (намагничивание вдоль ЛУС); снизу — 5 профилограмм поперек дорожки ЛУС после последовательного электролитического травления поверхности при δ = 750 (*1*); 382 (*2*); 312 (*3*); 172 (*4*) и 0 мкм (*5*)

ностные повреждения, например, прижоги или повышенный износ, при контроле которых необходимо учитывать упомянутые и другие специфические особенности ПУС. Например, при выявлении шлифовочных прижогов необходимо провести предварительный анализ природы этого прижога, в частности, оценить, является ли прижог в данном материале прижогом отпуска или закалки. В противном случае можно получить результаты с точностью до «наоборот». Предварительно оценить возможности измерения параметров ПУС можно с помощью формулы, полученной в [2]: $\gamma = 1 - S_з / S_д (1 - h)(1 - e^{-\alpha\delta})$, где $\gamma = V / V_н$ — нормированное значение сигнала магнитного шума; $V_н = V_н{}^0 S_п / \beta$ — сигнал при $\delta \neq 0$; α и β — коэффициенты затухания шума в упрочненном слое и основном металле соответственно; $V_н{}^0$ — величина сигнала при $\delta = 0$ (отсутствие закалки); $S_п$ — площадь датчика; $S_з$ — площадь зоны упрочнения, перекрываемой датчиком; $h = V_з / V_н$ — отношение сигналов магнитного шума от упрочненной структуры и неупрочненной основы соответственно.

Некоторые подходы к контролю усталости ферромагнитных материалов

Усталость металла всегда ведет к поверхностному разупрочнению. На последних стадиях усталости примеси и дефекты структуры сегрегируют на поверхности, образуя последовательно линии скольжения, полосы скольжения, поверхностные ступеньки, каверны и трещины. Таким образом, роль поверхности в «сценарии» усталостной деградации очень велика. С другой стороны, структурная перестройка в процессе усталости недостаточна, чтобы вызвать значительные изменения физических характеристик, измеряемых при НК: электропроводности, магнитной проницаемости, скорости ультразвука и т. п. Поэтому в течение многих лет надежная диагностика усталости на ранних ее стадиях представляет значительные трудности. Заметный прогресс достигнут при изучении фрактальных характеристик магнитного шума [16] во взаимосвязи с изменением мезоструктуры стали. Показано, что фрактальная размерность шума в процессе накопления усталостных повреждений монотонно возрастает и может количественно характеризовать стадии усталости. Другой подход [17] основан на измерениях послойного распределения параметров магнитного шума (рис. 9). Послойные измерения МШ производили после последовательного удаления слоев методом электролитического травления. Основной вывод состоит в том, что по мере усталостной деградации металла различие свойств слоев, находящихся на разной глубине от поверхности, возрастает в несколько

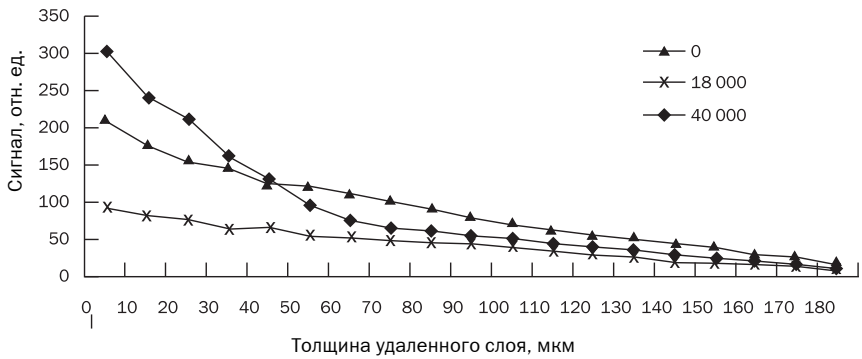

Рис. 9. Зависимость сигнала магнитного шума от толщины удаленного электрополировкой слоя после различных стадий циклирования пластины мартенситно-стареющего сплава ВНС-2: до циклирования, после 18000 циклов и после 40000 циклов (появление трещины) [17]

раз. Таким образом, прогресс в НК усталости может быть достигнут, если удастся дифференциально измерять разность поверхностных и подповерхностных свойств магнитного шума.

Новый взгляд на капиллярную дефектоскопию

Капиллярная дефектоскопия (КД) — традиционный метод выявления дефектов поверхностных слоев. Критическими вопросами всегда оставались недостаточный контраст при выявлении очень мелких дефектов, проблемы калибровки и метрологии, недостаточная производительность. Хотя повседневная практика КД мало изменилась за последние годы, в научном продвижении достигнуты значительные успехи.

Прежде всего была впервые построена теория гидродинамических процессов, лежащих в основе методов контроля проникающими жидкостями [18]. В нескольких направлениях наметился значительный прогресс. Приведем кратко его основные составляющие:

• обнаружено новое явление: двустороннее заполнение жидкостью погруженного в нее тупикового конического капилляра [19]. При этом жидкость заполняет канал капилляра не только со стороны его входа, но и со стороны его тупика, то есть из не имеющей прямого контакта с жидкостью вершины капилляра. В ряде случаев к моменту полного заполнения жидкостью конического канала объем этого внутреннего столбика существенно превышает объем классического столбика, проникающего из устья капилляра, что означает преимущественное заполнение канала со стороны тупика. Очевидно, что такое явление, влияющее на полноту заполнения пенетрантом полости поверхностного микродефекта, может сильно влиять на чувствительность капиллярного контроля. Позднее было показано [20], что механизм двустороннего заполнения тупиковых конических капилляров, основанный на перетекании полярной жидкости вдоль тонкой пленки от внешнего мениска к внутреннему, хорошо объясняет основные качественные особенности этого явления и приводит к количественным результатам, которые удовлетворительно согласуются с экспериментом;

• разработка средств количественной оценки как результатов капиллярного контроля, так и уровней чувствительности наборов дефектоскопических материалов. Около 10 лет назад учеными института прикладной физики НАН Беларуси совместно с коллегами из Федерального института исследований и испытаний материалов (Берлин, Германия) разработан и с тех пор успешно используется программно-аппаратный

комплекс, позволяющий регистрировать, распознавать и количественно анализировать видеоизображения индикаторных следов при капиллярном контроле. Предложены алгоритмы и соответствующее программное обеспечение для комплексной оценки геометрических и оптических характеристик индикаторных рисунков дефектов, выявленных на контролируемой поверхности;

• новое направление связано с использованием тепловых воздействий на стадиях применения проникающей жидкости и проявителя с целью повышения чувствительности и производительности капиллярного НК. Установлено, что использование нагрева объектов до температур, превышающих начальные на 20–40 °С, на основных стадиях контроля позволяет снизить порог чувствительности до 2 раз по сравнению со стандартной технологией контроля и приводит к сокращению оптимальной продолжительности пропитки дефектов с нескольких часов до нескольких минут;

• хорошие перспективы у метода электрохимической обработки поверхности (ЭХО). При ЭХО происходит интенсивное растворение поверхностного слоя металла без пластического деформирования последнего, что обеспечивает раскрытие устьев дефектов и их хорошую выявляемость при капиллярном контроле;

• установлено влияние на чувствительность и производительность капиллярного контроля полярности пенетранта, которая существенно (до 67% для исследованных пенетрантов) замедляет течение его пленки при двустороннем заполнении конических пор и трещин. Показано, что величины сдвиговой вязкости μ^{H}, полярности, характеризуемой относительной диэлектрической проницаемостью ε, а также микроструктурных параметров k и δ^{0} применяемого для дефектоскопии пенетранта при прочих равных условиях могут оказывать значительное влияние на результаты контроля. Рекомендовано выбирать полярный пенетрант, значение диэлектрической постоянной которого $17 < \varepsilon < 25$.

Описанные результаты исследований позволяют существенно повысить эффективность методов контроля проникающими веществами.

Контроль наноразмерных поверхностных дефектов

В настоящей статье не рассматриваются многочисленные методы контроля поверхностных наноструктур: атомная силовая, оптическая электронная и рентгеновская микроскопии. Однако об одном методе

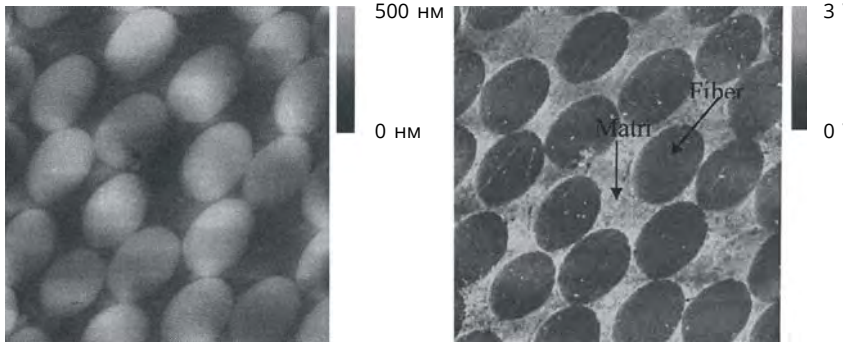

Рис. 10. Топографическая визуализация упрочняющих углеродных волокон на поверхности полимерной матрицы, полученная: слева — с помощью обычного атомного силового микроскопа (АСМ), справа — вихретокового АСМ [20]

контроля наноразмерных поверхностных структур следует упомянуть. Речь идет о вихретоковой визуализации с помощью атомного силового микроскопа (АСМ) [21]. Обычное пространственное разрешение вихретоковых дефектоскопов ограничено размерами датчика, которые обычно превышают 500 мкм. Однако в комбинации вихретокового метода и АСМ при визуализации локальных изменений электрической проводимости на поверхности изделий удается достичь субмикронного разрешения. На рис. 10 приведены топографические изображения упрочняющих углеродных волокон в полимерной матрице, полученные с помощью обычного атомного силового микроскопа и вихретокового АСМ. Высокое разрешение около нескольких нанометров достигается за счет нанесения магнитной пленки на обычный наконечник АСМ из нитрида кремния диаметром 10 нм, прижимающийся с усилием 0,1 Н/м. Изделие устанавливают на катушку, возбуждаемую от источника переменного тока с частотой 50–500 кГц. Магнитное поле, генерируемое катушкой, заставляет осциллировать магнитный наконечник и, соответственно, консоль АСМ, движение которой регистрируется прибором. Комбинация традиционного метода НК и новых систем для исследования субмикронных структур может оказаться весьма перспективной при исследовании новых материалов и методов поверхностного упрочнения.

Заключение

Настоящую статью не следует рассматривать как обзор современных методов неразрушающего контроля поверхностных слоев. Скорее это

субъективный взгляд автора на тенденции в развитии этого направления. Тем не менее статья дает некоторые представления о вызовах, которые ставит перед этой областью НК современный уровень развития технологий обработки поверхности материалов: повышение избирательной чувствительности к типу дефектов, повышение разрешающей способности до субмикронных величин, необходимость диагностики поверхностных слоев с разрешением свойств по глубине, диагностика многослойных многокомпонентных покрытий, поверхностных слоев, обработанных концентрированными источниками энергии.

Литература

1. Vengrinovich V. L., Knyazev M. A. Vishnevsky A. L., The principles of depth analysis of surface hardened layers by magnetic noise method. — Research in NDE. 1992. V. 4, No. 1. P. 19027.

2. Венгринович В. Л. Магнитошумовая структуроскопия. — Мн.: Навука і тэхніка, 1991. — 285 с.

3. Арсенин В. Я. Методы математической физики и специальные функции. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 384 с.

4. Abu-Nabah B. A., Yu F., Nagy P. B. Electromagnetic Techniques for Residual Stress Measurements / Lecture made in 1 Workshop on Residual Stress Measurements. — Cincinnati: Dept. Aerospace Eng. & Eng. Mechanics, University of Cincinnati, 2006.

5. Bruno A. C. Imaging flaws in magnetically permeable structures using the truncated generalized inverse on leakage fields. — J. Appl. Phys. 1997. V. 82. No. 12. P. 5899–5906.

6. Vengrinovich V. L., Emelyanenkov S. A., Tillack G. R. 2D flaw image restoration from magnetic leakage field data using singular value decomposition and Bayesian techniques. — In: 9th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE'2003), CEA Saclay, France, May 15–16, 2003.

7. Sabbach H. A., Sabbach E. H., Murthy R. K., Nyenhuis J. Assessing thermal barrier coatings by eddy-current inversion / Ed. by D. Thompson, D. Chimenti. — Rev. of Progress in QNDE. 2002. V. 21. P. 722–727.

8. Баев А. Р., Майоров А. Л., Тищенко М. А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий. — Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 167–271.

9. Goldfine N. J. et al. Scanning and Permanently Mounted Conformable MWM Eddy Current Arrays for Fatigue / Corrosion Imaging and Fatigue Monitoring. — In: USAF ASIP Conf., San Antonio, December 6, 2000.

10. Goldfine N. J. et al. Surface Mounted Periodic Field Eddy Current Sensors for Structural Health Monitoring. — In: SPIE Conf. Smart Structures and Materials, NDE for Health Monitoring and Diagnosis, Newport Beach, March 4–8, 2001.

11. Zilberstein V., Schlicker D., Walrath K. et al. MWM Eddy Current Sensors for Monitoring of Crack Initiation and Growth during Fatigue Tests and in Service. — Internat. J. Fatigue. 2001. V. 23 (Supplement). P. S477 — S485.

12. Zilberstein V., Fisher M., Grundy D. et al. Residual and Applied Stress Estimation from Directional Magnetic Permeability Measurements with MWM Sensors. — ASME J. Pressure Vessel Technology. 2002. April. P. 127–136.

13. Венгринович В. Л., Астапчик С. А., Бабушкин В. Б. и др. Особенности неразрушающего контроля структурных зон лазерного упрочнения. — Физика и химия обработки материалов. 1984. № 7. С. 10–15.

14. Венгринович В. Л., Якунин В. П., Леготин С. Д., Бусько В. Н. Контроль параметров лазерно-упрочненных слоев ферромагнитных материалов методом эффекта Баркгаузена. — Дефектоскопия. 1986. № 2. С. 87–89.

15. Леготин С. Д. Контроль параметров лазерно-упрочненных слоев ферромагнитных материалов методом эффекта Баркгаузена / Диссерт. на соск. уч. степ. к. т. н. — Минск, 1989. — 126 с.

16. Screiber J., Cikalova U. Vertyagina Ye. Use of the fractal nature of spatial and temporal response behavior for materials damage characterization. — In: Proc. 6th Int. Conf. on Low Cycle Fatigue / Special Issue. — Berlin, 2007, p. 655–660.

17. Vengrinovich V. L, Busco V. N. New approach to fatigue damage evaluation via Barkhausen noise. — http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_01_10.pdf

18. Прохоренко П. П., Мигун Н. П. Введение в теорию капиллярного контроля. — Минск: Наука и техника, 1988, — 207 с.

19. Довгялло Г. И., Мигун Н. П., Прохоренко П. П. О полном заполнении жидкостью тупиковых конических капилляров. — Инженерно-физический журнал. 1989. Т. 56. № 4. С. 563–565.

20. Мигун Н. П., Шнип А. И. Модель пленочного течения в тупиковом коническом капилляре. — Там же. 2002. Т. 75. № 6. С. 145–150.

21. Nalladega V, Sathish S., Yata K. V., Blodgett M. P. High resolution eddy current imaging with atomic force microscope / Ed. by D. Thompson, D. Chimenti. — Rev. of Progress in QNDE. 2008. P. 400–405.

Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей

Сотрудники
ЗАО «Константа»
Санкт-Петербург

Сясько Владимир Александрович
Генеральный директор, д. т. н. Научные интересы: контроль физико-механических характеристик, микро- и наноструктурированных материалов.

Чертов Дмитрий Николаевич
Инженер-электронщик, аспирант НМСУ «Горный».

В авиа-, ракето- и судостроении существенно возросло применение конструкционных углепластиковых материалов (УКМ).

В процессе производства и эксплуатации изделий из УКМ могут образовываться различные виды неоднородностей структуры, в том числе расслоения, обусловленные потерей связи между слоями армирующего материала за счет недостатка связующего или за счет механических напряжений или высокой температуры [1].

Изделия из УКМ могут быть площадью до десятков квадратных метров. В большинстве случаев при контроле затруднен двусторонний доступ к стенке изделия, что, в совокупности со спецификой структуры материала, серьезно ограничивает число видов НК для выявления указанных дефектов. В связи с этим представляет интерес использование вихретокового вида НК для решения задач выявления расслоений и оценки глубины их залегания.

Для данной задачи объект контроля следует рассматривать как многослойную электропроводящую неферромагнитную пластину толщиной T с электропроводностью σ_i каждого слоя. При этом можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности $\sigma_и$ объекта контроля в объеме распространения вихревых токов. Проведенные в соответствии с [2] исследования показали, что для большинства изделий из УКМ $\sigma_и$ лежит в диапазоне $\approx 5 \div 40$ кСм/м и может сильно варьироваться (до $\pm 10 \div 15\%$) в одном изделии.

Вихретоковый фазовый метод измерения параметров изделий из электропроводящих материалов

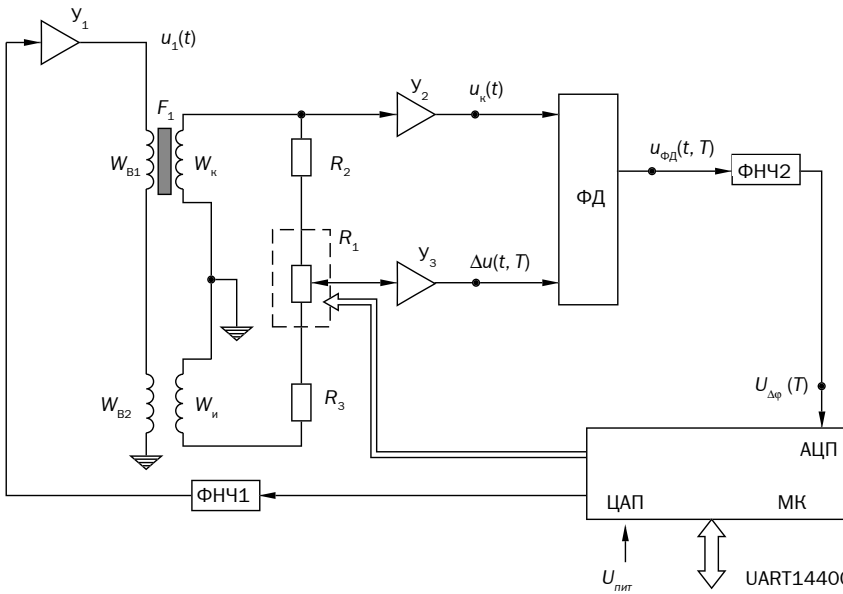

Рис. 1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя: $У_1$—$У_3$ — усилители, ФД — фазовый детектор, ФНЧ1—ФНЧ2 — фильтры низкой частоты, $W_{в1}$, $W_{в2}$ — обмотки возбуждения, $W_к$ и $W_и$ – дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки, МК — микроконтроллер, R_1 – управляемый цифровой балансировочный потенциометр, F_1 — ферритовый броневой сердечник

основан на анализе электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте, которые зависят от T, $\sigma_и$ и геометрических характеристик материала (диаметра d, шероховатости R_z и др.), а также величины зазора h между изделием и контактной поверхностью преобразователя.

Структурная схема трансформаторного трехобмоточного вихретокового фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис. 1.

Обмотка $W_в$ запитывается синусоидальным напряжением $u_1(t)$ частоты f. Усиленное разностное (вносимое) напряжение $\Delta u(t, T)$ поступает на фазовый детектор ФД. Опорным сигналом для фазового детектора служит напряжение $u_к(t)$ с выхода компенсационной обмотки $W_к$. Постоянное напряжение $U_{\Delta\varphi}$ на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз $\Delta\varphi$ между напряжением $u_к(t)$ и разностным (вно-

симым) напряжением $\Delta u(t, T)$. Балансировка обмоток преобразователя производится с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером.

Используемые для большинства задач контроля и измерений традиционные чувствительные элементы, состоящие из двух соосных круговых обмоток, ось которых перпендикулярна поверхности изделия, в данном случае не подходят, т. к. создаваемый круговой вихревой ток не будет изменять свою картину при наличии внутренних расслоений материала [3]. Представляет интерес использование линейных проводников для формирования вихревых токов в изделии [4]. Линейный участок проводника с высокочастотным гармоническим током $i(t)$, параллельный поверхности электропроводящего изделия, а также картина создаваемых им вихревых токов $i_в(t)$ в сечении, проходящем через проводник перпендикулярно к поверхности, представлены на рис. 2*а*. В случае наличия расслоения картина вихревых токов претерпит изменения, возникнут два контура вихревых токов $i_в(t)$ и $i_в'(t)$.

Предлагаемая схема обмоток чувствительного элемента тангенциального преобразователя для выявления внутренних расслоений представлена на рис. 2.

Квадратная обмотка возбуждения $W_{в2}$ одной из сторон устанавливается на изделие и создает вихревой ток $i_в(t)$ (рис. 2*а*). Измерительная обмотка $W_и$ находится в плоскости обмотки W_2 (обмотки $W_{в1}$ и $W_к$, располагаемые на удалении от изделия, условно не показаны). Вносимое

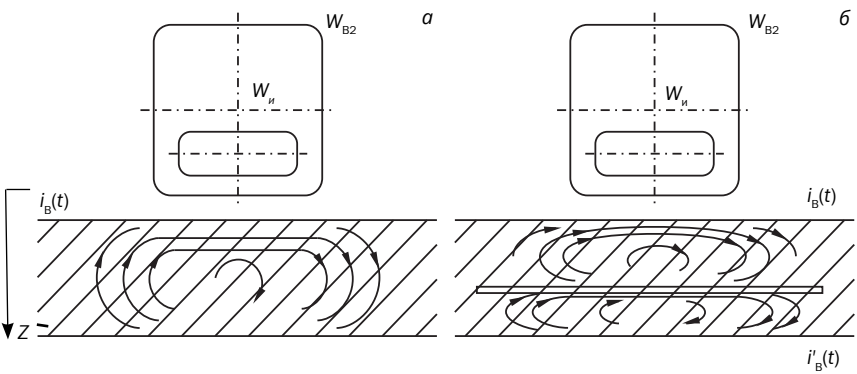

Рис. 2. Чувствительный элемент преобразователя для выявления внутренних расслоений в изделии: W_2 — обмотка возбуждения, W_m — измерительная обмотка. Картина распределения вихревых токов в плоскости обмоток: а — без расслоения, б — при расслоении

напряжение $\mathring{U}_{вн}$ на измерительной обмотке $W_и$ будет зависеть, в том числе, от наличия расслоений, размеры которых сопоставимы с размером зоны контроля чувствительного элемента. Размеры зоны контроля можно считать приблизительно $2L \times 2L$, где L — длина стороны обмотки W_2. Если при сканировании поверхности изделия преобразователь будет пересекать расслоение, сопоставимое по размерам с его зоной контроля, то картина вихревых токов изменится, появятся два контура вихревых токов в каждом из слоев изделия (рис. 2*б*), что вызовет изменение амплитуды и фазы $\mathring{U}_{вн}$.

В качестве обобщенного параметра для данного преобразователя примем величину $\beta_z = L\,(2\pi f \sigma_и \mu_0)^{1/2}$.

Для обеспечения приемлемой чувствительности при контроле расслоений величину β_z будем выбирать на уровне 0,5 ÷ 2. Максимальная толщина контролируемых изделий должна выбираться из условия $T_{max} \approx 1{,}4\delta$ [5], где $\delta = 1/(\pi f \sigma_и \mu_0)^{1/2}$.

Отсюда следует, что оптимальное значение частоты преобразователей для контроля расслоений равно: $f_0 \approx 1{,}96/(\pi \mu_0 \sigma_и T_{max}^2)$.

Для изделий с интегральной электропроводностью $\sigma_и$ = 35 кСм/м оптимальные частоты для граничных значений T составят $f_o\big|_{T\,=\,10\text{ мм}} \approx 140$ кГц и $f_o\big|_{T\,=\,2\text{ мм}} \approx 1{,}4$ МГц. Для изделий с интегральной электропроводностью σ_i = 7 кСм/м $f_o\big|_{T\,=\,10\text{ мм}} = 704$ кГц и $f_o\big|_{T\,=\,2\text{ мм}} = 17{,}5$ МГц. Для преобразователей с L = 6 ÷ 15 мм при рассчитанных значениях частот $\beta_z \approx 1{,}4 \div 3$, что, в принципе, удовлетворяет условиям обеспечения оптимальной чувствительности.

На рис. 3 представлена зависимость $\mathring{U}^*_{вн} = \mathring{U}^*_{вн} / \left|\mathring{U}^*_0\right|$ от толщины изделия с электропроводностью $\sigma_и$ = 35 кСм/м для преобразователя с параметрами $f \approx 0{,}9$ МГц и L = 15 мм (кривая *1*). Кривая *2* — зависимость $\mathring{U}^*_{вн}$ от положения расслоения по глубине Z для изделия с максимальной толщиной 3,6 мм. При толщине слоя углепластикового полотна 0,6 мм во всем диапазоне изменения Z от 0,6 до 3 мм обеспечивается приемлемая

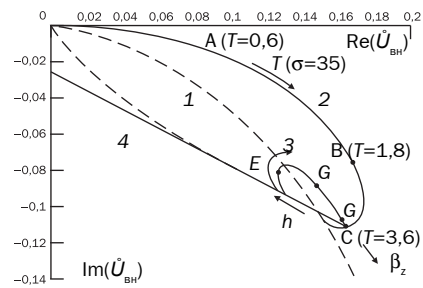

Рис. 3. Зависимость комплексного вносимого напряжения $\mathring{U}_{вн}$ от глубины залегания расслоения Z для изделия с параметрами T = 3,6 мм, σ_i = 35 кСм/м (*E*: Z = 0,6 мм, *F*: Z = 1,8 мм, *G*: Z = 3 мм)

чувствительность, позволяющая уверенно выявлять расслоения при указанной выше девиации $\sigma_и$. Линия отвода *4* иллюстрирует влияние *h*. Для подавления влияния зазора (а также эквивалентных зазору R_z и *d*) необходимо электронной балансировкой с использованием управляемого потенциометра R_1 смещать точку комплексного относительного вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину $\mathring{U}^*_{of}$, соответствующую толщине изделия *T*.

Для других значений $\sigma_и$ и *T* годографы, рассчитанные в соответствии с определенными выше параметрами, носят аналогичный характер с соответствующим масштабированием. Рассматриваемый преобразователь (рис. 4) не позволяет плавно изменять частоту возбуждающего тока, поэтому необходимо оптимальным образом подобрать частоты нескольких преобразователей для перекрытия диапазонов измерения *T* и σ.

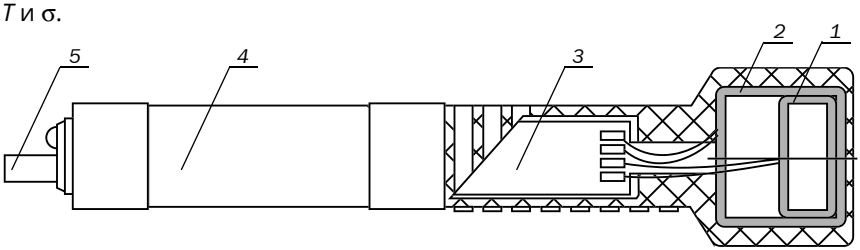

Рис. 4. Конструкция измерительного преобразователя: *1* — измерительная обмотка; *2* — возбуждающая обмотка; *3* — печатная плата; *4* — корпус; *5* — соединительный кабель к блоку обработки и представления информации

Градуировка преобразователей производится на эталонных образцах с искусственными (заложенными) расслоениями, которые изготавливаются по технологии производителя изделий. Семейство характеристик записывается в память микроконтроллеров измерительных преобразователей. Элементы электрической схемы, представленной на рис. 1, располагаются на печатной плате внутри преобразователей, что позволяет существенно уменьшить уровень наводок и собственных шумов и обеспечить требуемую чувствительность при измерениях. Связь с блоком обработки и представления информации «Константа ВД1» осуществляется по каналу связи UART.

Диапазон толщин стенок контролируемых изделий составляет от 2 до 12 мм при электропроводности от 7 до 42 кСм/м. Влияние зазора подавляется в диапазоне до 0,3 мм, а шероховатости до величины

$R_z \approx 150$ мкм. Абсолютная погрешность измерения глубины залегания дефекта не превышает половины толщины слоя углепластикового полотна. Прибор «Константа ВД1» с комплектом преобразователей внедрен на ряде предприятий.

Литература

1. Перепелкин К. Е. Полимерные композиты на основе химических волокон, их основные виды, свойства и применение. URL: http://www.uncm.ru/

2. Pauw van der L. J. A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. — Philips Techn. Rev. 1958/59. V. 20. No. 8. P. 220–224.

3. Дорофеев А. Л., Никитин А. И., Рубин А. Л. Индукционная толщинометрия. — М.: Энергия, 1978. — 184 с.

4. Moles M., Lamarre A., Dupuis O. Complete inspection of friction stir welds in aluminum using ultrasonic and eddy currents arrays. — In: 16th WCNDT. — Montreal, 2004, paper No. 84.

5. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий./Научное, методическое, справочное пособие. — СПб.: Гуманистика, 2009. — 904 с.