
Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-89-99

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

В.С. Шитиков¹, С.С. Пичугин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность оценки распределения электрических свойств по глубине объекта с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля. Проведено экспериментальное опробование оценки напряженно-деформированного состояния пластины из титанового сплава при изгибе с помощью получения сигнала преобразователя в широком диапазоне частот. Анализ экспериментальных данных осуществляли с применением аналитического расчета сигнала преобразователя. В результате проведенных исследований установлено наличие связи между механическими напряжениями и электрической проводимостью, показана возможность эффективного контроля уровня напряжений вихретоковым методом.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, напряженно-деформированное состояние, удельная электрическая проводимость, варьирование частоты, растягивающие напряжения, сжимающие напряжения

Для цитирования: Шитиков В.С., Пичугин С.С. Оценка распределения электрических свойств при упругой деформации объекта контроля вихретоковым методом // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-89-99.

Scientific article

ESTIMATION OF ELECTRICAL PROPERTIES DISTRIBUTION UNDER ELASTIC DEFORMATION OF THE CONTROL OBJECT BY EDDY CURRENT METHOD

V.S. Shitikov¹, S.S. Pichugin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article deals with the possibility of estimating the distribution of electrical properties along the depth of the object using eddy current method of nondestructive testing. Experimental testing of stress-strain state estimation of titanium alloy plate at bending by means of transducer signal acquisition in a wide range of frequencies is carried out. The experimental data was analyzed using analytical calculation of the transducer signal. As a result of the studies, the relationship between mechanical stresses and electrical conductivity was established, and the possibility of effective control of the stress level by eddy current method was shown.

Keywords: eddy current inspection, stress-strain state, specific electrical conductivity, frequency variation, tensile stresses, compressive stresses

For citation: Shitikov V.S., Pichugin S.S. Estimation of electrical properties distribution under elastic deformation of the control object by eddy current method. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-89-99.

Введение

Повышение требований к надежности ответственных деталей авиационной техники, внедрение новых материалов и технологий при их производстве приводят к необходимости совершенствования как методов контроля готовых деталей на наличие дефектов, так и контроля различных физико-механических свойств полуфабрикатов [1–3]. Одной из таких задач является анализ напряженно-деформированного состояния на различных этапах производства [4–6].

Одним из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля свойств является вихретоковый [7], который заключается в создании в объекте контроля поля вихревых токов и анализе напряжения, наводимого этим полем в обмотках преобразователя. Метод позволяет эффективно оценивать электрическую проводимость немагнитных материалов, которая связана со многими механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками.

В статье [8] показана возможность интегральной оценки напряженно-деформированного состояния вихретоковым методом контроля. Приведены результаты сравнения измерений с тензометрическим методом. Видно, что применение метода позволяет охарактеризовать лишь деформацию поверхностных слоев. При этом отсутствие информации о распределении свойств по глубине не позволит на практике отличить изменение электрических свойств, обусловленное напряженно-деформированным состоянием, от случайного изменения проводимости в пределах детали или полуфабриката, а также отстроиться от таких мешающих факторов, как, например, изменение толщины плакирующего слоя. В данной статье будет опробован метод, основанный на анализе сигнала вихретокового преобразователя в частотной области. Поскольку с изменением частоты магнитного поля меняется его глубина проникновения, то варьируя частоту можно получить информацию о различных слоях объекта контроля.

Материалы и методы

Вихретоковый метод оценки напряженно-деформированного состояния

Рассмотрим более подробно принцип оценки механических напряжений вихретоковым методом по удельной электрической проводимости. Проводимость металла связана с длиной свободного пробега электрона, которая определяется рассеянием, вызванным нарушением периодичности кристаллической решетки материала [9]. В свою очередь нарушения периодичности кристаллической решетки связаны с напряженно-деформированным состоянием.

Экспериментальное опробование, результаты которого приведены в статье [8], проводилось на образце в виде диска из титанового сплава ВТ6 толщиной 6 мм, нагрузка на котором регулировалась с помощью разработанной специализированной оснастки. При сравнении тензометрических испытаний с сигналом вихретокового преобразователя подтверждена возможность оценки напряженно-деформированного состояния вихретоковым методом, при этом напряжения в проведенных испытаниях не выходили из упругой области. Изменение проводимости при максимальной нагрузке не превышало 1 % от удельной проводимости образца.

В описанном эксперименте проводимость при нагружении изменялась в одну сторону – это изменение соответствует изменению проводимости в поверхностных слоях, которые растягиваются при нагрузке. Более глубокие относительно преобразователя слои испытывают при этом сжатие, но изменение их проводимости экранировано внешними слоями металла. Чем выше частота тока возбуждения, тем больше чувствительность к электрическим свойствам поверхностных слоев. Снижение же частоты приводит к выравниванию чувствительности.

Глубина проникновения вихревых токов может быть оценена по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \sigma}}, \quad (1)$$

где δ – глубина проникновения, м; σ – удельная электрическая проводимость, См/м; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м; f – частота тока возбуждения, Гц.

Таким образом, каждой частоте тока возбуждения соответствует интегральная оценка изменения проводимости, складывающаяся из изменений проводимости отдельных слоев, при этом чувствительность к изменению проводимости экспоненциально убывает с глубиной в соответствии с формулой (1).

Для анализа возможности послойной оценки изменения проводимости вихретоковым методом необходимо получить математическую зависимость вносимого напряжения от изменения проводимости многослойного объекта контроля. Экспериментально эффективность контроля проводимости отдельных слоев может быть подтверждена оценкой распределения напряжений при изгибе пластины в упругой области, что приведет к растягивающим механическим напряжениям, с одной стороны, и к сжимающим – с другой.

Расчет вносимого напряжения вихретокового преобразователя

На рис. 1 представлена схема вихретокового преобразователя, одна катушка которого возбуждающая – для создания электромагнитного поля, другая измерительная – для измерения наводимой электродвижущей силы (ЭДС).

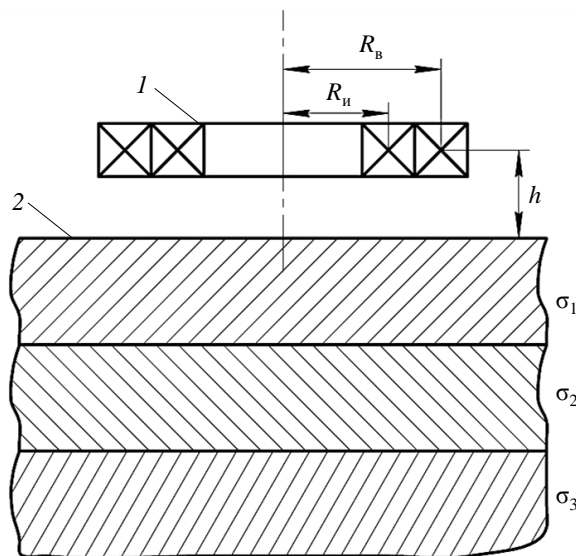


Рис. 1. Схема вихретокового преобразователя, размещенного над трехслойным объектом контроля

На рис. 1 изображена схема вихретокового преобразователя, размещенного над трехслойным объектом контроля (под слоем подразумевается часть объекта контроля определенной толщины), где 1 – вихретоковый преобразователь; 2 – объект контроля; $R_{и}$ – радиус измерительной катушки; $R_{в}$ – радиус возбуждающей катушки; h – зазор между преобразователем и поверхностью объекта контроля; σ_1 , σ_2 , σ_3 – соответственно удельные электропроводности первого и второго слоев, а также основания (бесконечного полупространства).

Согласно работе [10], для конфигурации преобразователя, представленного на рис. 1, вносимая ЭДС может быть определена по формуле

$$\dot{E}_{\text{вн}} = \omega \cdot I \cdot W_{\text{в}} \cdot W_{\text{и}} \cdot \mu_0 \cdot R \cdot j \cdot \pi \cdot \int_0^{\infty} \frac{x(q_{\text{в}} \cdot A + q_{\text{с}} \cdot B \cdot \text{th}(q_{\text{в}} T_{\text{в}}) - q_{\text{в}}(q_{\text{в}} \cdot A \cdot \text{th}(q_{\text{в}} T_{\text{в}}) + q_{\text{с}} \cdot B))}{x(q_{\text{в}} \cdot A + q_{\text{с}} \cdot B \cdot \text{th}(q_{\text{в}} T_{\text{в}}) + q_{\text{в}}(q_{\text{в}} \cdot A \cdot \text{th}(q_{\text{в}} T_{\text{в}}) + q_{\text{с}} \cdot B))} \cdot G dx, \quad (2)$$

для которой введены следующие обозначения:

$$R = \sqrt{R_{\text{в}} \cdot R_{\text{и}}}; \quad (3)$$

$$A = q_{\text{с}} + q_{\text{н}} \cdot \text{th}(q_{\text{с}} T_{\text{с}}); \quad (4)$$

$$B = q_{\text{н}} + q_{\text{с}} + \text{th}(q_{\text{с}} T_{\text{с}}); \quad (5)$$

$$G = J_1\left(\frac{R_{\text{в}}}{R} \cdot x\right) \cdot J_1\left(\frac{R_{\text{и}}}{R} \cdot x\right) e^{-Hx}; \quad (6)$$

$$q_{\text{в,с,н}} = \sqrt{x^2 + j \cdot \beta_{\text{в,с,н}}^2}, \quad (7)$$

где $\beta_{\text{в,с,н}}$ – обобщенные параметры, характеризующие удельную электрическую проводимость верхнего, среднего и нижнего слоев

$$\beta_{\text{в,с,н}} = R \sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{\text{в,с,н}}}; \quad (8)$$

$T_{\text{в,с}}$ – обобщенные параметры, характеризующие толщину верхнего и среднего слоев:

$$T_{\text{в,с}} = \frac{t_{\text{в,с}}}{R}; \quad (9)$$

$$H = \frac{h_{\text{в}} + h_{\text{и}}}{R} = \frac{2h}{R}, \quad (10)$$

где H – обобщенный параметр, характеризующий величину зазора; $W_{\text{в}}$ – число витков возбуждающей обмотки, ед.; $W_{\text{и}}$ – число витков измерительной обмотки, ед.; $R_{\text{и}}$ – радиус измерительной катушки, м; $R_{\text{в}}$ – радиус возбуждающей катушки, м; $J_1\left(\frac{R_{\text{в}}}{R} \cdot x\right)$, $J_1\left(\frac{R_{\text{и}}}{R} \cdot x\right)$ – функции Бесселя первого рода первого порядка; ω – круговая частота тока I в возбуждающей обмотке датчика, рад · с⁻¹; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Расчет по формуле (2) позволяет без применения ресурсоемких конечно-элементных моделей оценить зависимость напряжения вихретокового преобразователя от частоты питающего тока и проводимости неоднородного объекта контроля. Для сопоставления расчетных значений с экспериментальными необходимо учесть влияние усилительного тракта дефектоскопа. Для этого необходимо провести калибровку на образцах, проводимость которых известна, а электрические свойства однородны.

Калибровка вихретокового преобразователя

Образцы для калибровки необходимо выбирать исходя из значения проводимости образца, который планируется нагружать для оценки напряжений. Испытания проводили на образце в виде пластины толщиной 3 мм, удельная электрическая проводимость которой, равная 0,55 МСм/м, оценена вихретоковым методом. Для калибровки выбраны образцы со значениями проводимости: 0,63; 0,73; 0,81 и 1,26 МСм/м. Толщина образцов составляла 6 мм.

Как показано в статье [8], упругие напряжения приводят к очень незначительным изменениям проводимости – не более 1–2 % во всем возможном диапазоне нагрузок, который определяется упругой областью. Для повышения соотношения сигнал/шум и выделения полезной части, испытания проводили с применением двух преобразователей, обмотки которых соединены таким образом, что выходной сигнал определяется разностью электрических свойств в местах установки.

При калибровке один из преобразователей находился на образце с проводимостью 0,63 МСм/м, второй – помещался поочередно на другие образцы с проводимостями: 0,73; 0,81 и 1,26 МСм/м соответственно. Параметры используемых преобразователей: $R_{и} = 2,3$ мм, $R_{в} = 2,7$ мм, зазор преобразователя h составляет 2,5 мм.

Основным мешающим фактором при проведении данных испытаний является изменение зазора. Так, при нагружении образца искривление поверхности приводит к увеличению зазора между преобразователем и поверхностью образца до 25 мкм (по краям преобразователя). Расчеты показывают, что подобные сигналы от изменения зазора могут в разы превышать полезный сигнал от изменения распределения механических напряжений.

Отстройку от влияния зазора осуществляли амплитудно-фазовым методом. Таким образом, информативным параметром будет являться проекция вектора приращения напряжения с измерительной обмотки преобразователя [11, 12].

Для анализа возможности получения распределения проводимости по глубине образца изменяли частоту тока возбуждения преобразователя в диапазоне от 100 Гц до 100 кГц. Калибровка заключалась в нормировании расчетных значений проекции вносимого напряжения частным от деления экспериментально полученного значения на образце с проводимостью 0,73 МСм/м на частоте 60 кГц на соответствующее ему расчетное значение. Полученные экспериментальные и расчетные данные приведены на рис. 2.

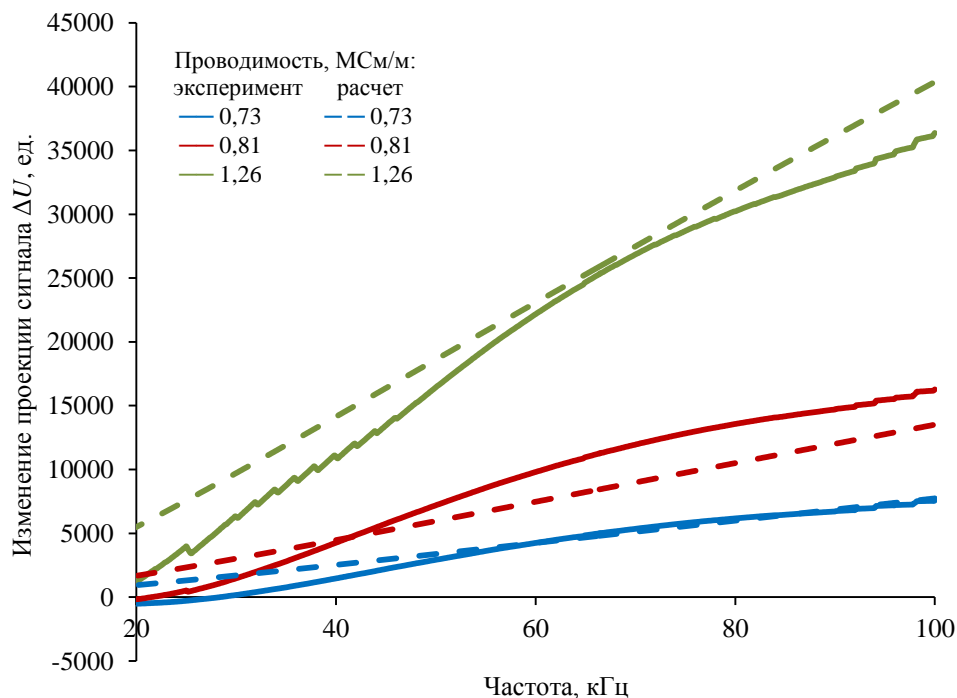


Рис. 2. Зависимости вносимого напряжения от частоты, соответствующие различным значениям проводимости, полученные экспериментальным и расчетным путем

Видно, что приращение проекции, полученное расчетным путем, хорошо согласуется с экспериментальными данными. Расхождение в области низких частот объясняется ухудшением частотных характеристик преобразователя в этой области. Избыточная кривизна экспериментальных кривых вызвана тем, что отстройку от зазора проводили относительно годографа зазора на образце с проводимостью 0,55 МСм/м, который планируется нагружать.

Распределение механических напряжений

Для опробования оценки распределения механических напряжений в образце вихретоковым методом выбрана пластина из титанового листа из сплава марки ВТ6 с размерами 105×30×3 мм. Нагружение пластины осуществляли посредством четырехточечного изгиба в оснастке в виде скобы. Схема нагружения представлена на рис. 3: с одной стороны образца – растягивающие положительные напряжения, с другой – сжимающие отрицательные [13]. Вихретоковый преобразователь расположен со стороны растягивающих напряжений.

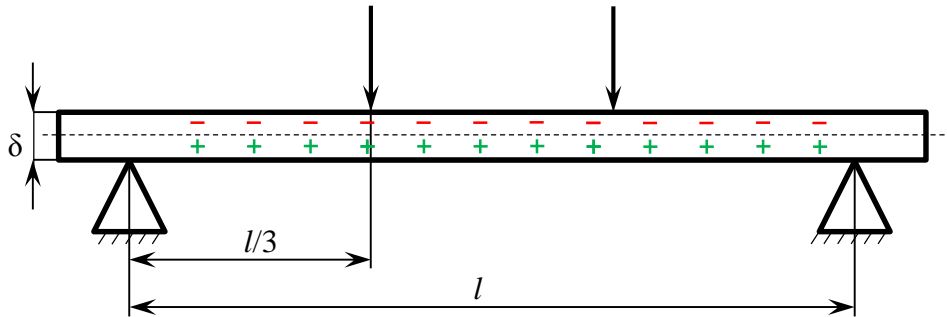


Рис. 3. Четырехточечная схема изгиба образца с растягивающими (+) и сжимающими (-) напряжениями

Напряжения в образце рассчитывали по стреле прогиба. В соответствии с ГОСТ 9.019–74 [14], стрела прогиба образца при четырехточечном изгибе связана с напряжениями следующей формулой:

$$f_1 = \frac{5,75 \cdot \sigma \cdot l^2}{27 \cdot E \cdot \delta}, \tag{11}$$

где σ – напряжение, Па; E – модуль упругости, Па; l – расстояние между опорами в скобе, мм; δ – толщина пластины, мм; f_1 – стрела прогиба, мм.

Расстояние между опорами в оснастке (скобе) составляет 90 мм, модуль упругости титанового листа сплава ВТ6 $E = 115$ ГПа, толщина пластины 3 мм (измерена с точностью 0,01 мм). Подставив данные значения в формулу (11), при стреле прогиба 2 мм получим значение напряжений 400 МПа.

Исходя из данных справочника [15], можно построить теоретическое распределение напряжений по глубине – зависимость напряжения от глубины имеет линейный характер, симметрична относительно центра пластины, при этом действуют как положительные растягивающие, так и отрицательные сжимающие напряжения ($\sigma_{\max} = 400$ МПа). Зависимость распределения приложенных напряжений для стрелы прогиба 2 мм показана на рис. 4. Согласно ГОСТ 9.019–74, стрелу прогиба определяли с помощью индикатора часового типа, погрешность которого составляет 0,01 мм.

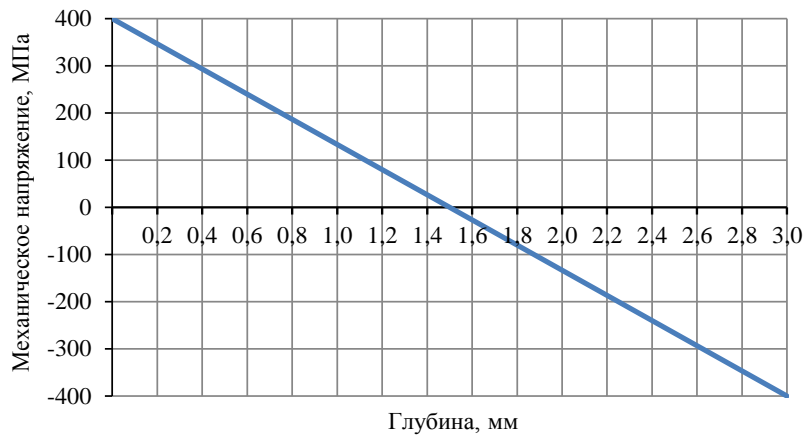


Рис. 4. Распределение механических напряжений при четырехточечном изгибе для стрелы прогиба 2 мм

Проведение испытаний по оценке механических напряжений

Испытания проводили в специальной оснастке для изгиба по четырехточечной схеме, показанной на рис. 5.

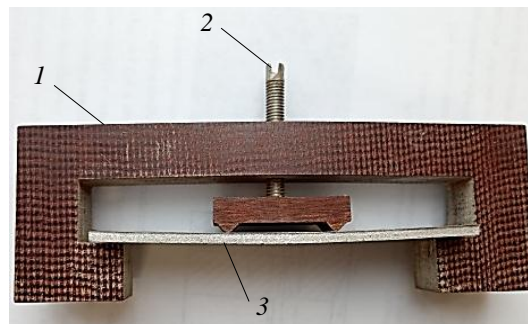


Рис. 5. Оснастка для изгиба по четырехточечной схеме: 1 – оснастка; 2 – винт для задания величины изгиба; 3 – нагружаемый образец

Образец 3 из титанового сплава ВТ6 закрепляли в оснастке 1 путем вкручивания винта 2, шаг резьбы которого составляет 1 мм. Стрела прогиба определяет напряжения в образце.

При проведении испытаний один из двух дифференциально включенных преобразователей закреплен на поверхности образца в оснастке 3, а второй – на поверхности образца, который не подвергался нагрузке. Оба образца имеют одинаковые размеры и изготовлены из одного листа. При двух значениях нагрузки, соответствующих значениям стрелы прогиба 1 и 2 мм, сняты зависимости разницы вносимых напряжений между образцами под нагрузкой и без нагрузки. Для отстройки от зазора также применяли амплитудно-фазовый метод отстройки.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Главная задача данной работы – экспериментальное подтверждение возможности оценки распределения электрических свойств по глубине образца с помощью вихретокового контроля. После получения экспериментальных зависимостей проекции вектора вносимого напряжения от частоты остается получить соответствующие зависимости расчетным путем и сопоставить результаты. При расчете напряжения с помощью

формулы (2) объект контроля разбили на 50 слоев, проводимость которых менялась линейно – аналогично распределению напряжений на рис. 4. Линейная зависимость изменения проводимости от напряжений в упругой области предполагается на основании результатов приведенных в работе [8].

Точное значение изменения проводимости на поверхности при этом заранее неизвестно, несмотря на известное значение механических напряжений, так как в источнике [8] получена лишь интегральная оценка изменения проводимости, из которой невозможно вычислить количественную связь проводимости и напряжений. Поэтому значение изменения проводимости на поверхности подбирали исходя из наилучшего совпадения результатов.

Для того чтобы убедиться, что при других видах распределения свойств невозможно получить результаты, близкие к экспериментальным, рассчитано изменение проекции вносимого напряжения для случаев, когда электрическая проводимость изменяется равномерно по всей глубине, а также распределения, не симметричные относительно центра образца. Распределения проводимости, для которых выполняли расчеты, приведены на рис. 6, где ожидаемому распределению соответствует линейное изменение от -4 до $+4$ %. На рис. 6–8 обозначено относительное изменение удельной электрической проводимости $\Delta\sigma_1$ на поверхности образца под преобразователем, $\Delta\sigma_2$ – с обратной стороны, т. е. со стороны нагружения в эксперименте.

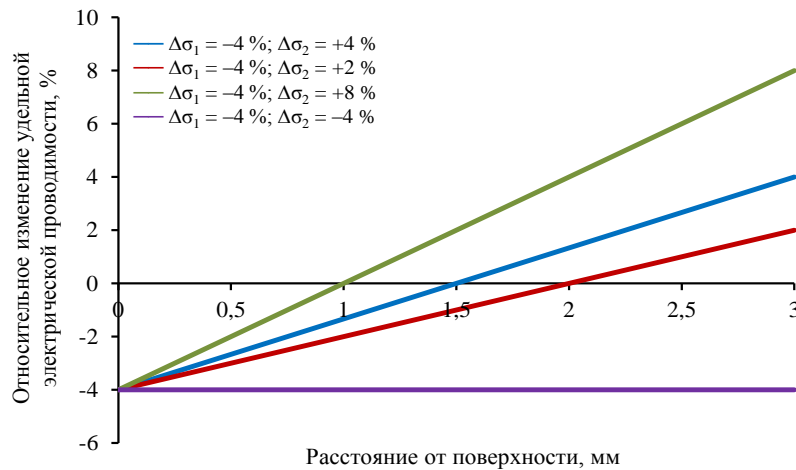


Рис. 6. Задаваемые для расчета распределения удельной электрической проводимости в процентах относительно проводимости образца

На рис. 7 представлены полученные расчетным путем зависимости изменения проекции вносимого напряжения преобразователя, соответствующие распределениям удельной электрической проводимости на рис. 6.

Видно, что различным распределениям электрической проводимости по глубине объекта контроля соответствуют различные зависимости проекции напряжения от частоты. Существенные качественные отличия приведенных зависимостей подтверждают возможность оценки распределения электрических свойств по глубине образца по полученному частотному отклику.

На рис. 8 приведено сравнение данных, которые получены экспериментально для значений стрелы прогиба 1 и 2 мм, и расчетных значений, которые получены для линейных изменений проводимости от -4 до $+4$ % (соответствует 2 мм) и от -2 до $+2$ % (соответствует 1 мм). Для иллюстрации качественных отличий зависимостей проекции напряжения от частоты для различных видов распределения напряжений по глубине, на рис. 8 дополнительно приведена проекция вносимого напряжения, рассчитанная для равномерного изменения проводимости.

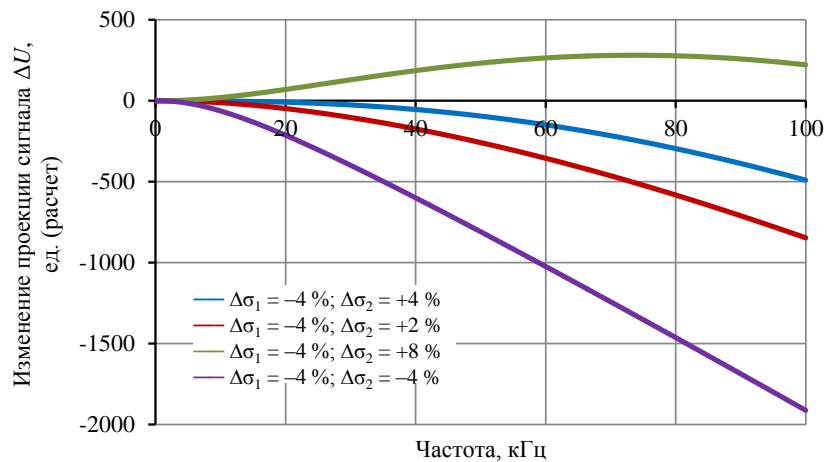


Рис. 7. Полученные расчетным путем зависимости изменения проекции сигнала от частоты

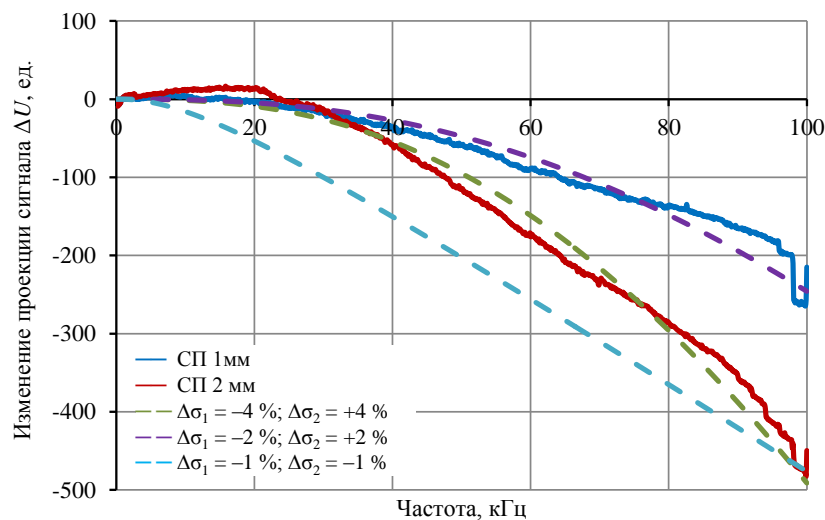


Рис. 8. Зависимости изменения проекции сигнала от частоты (сплошной линией показаны экспериментальные данные, пунктиром – расчетные; СП – стрела прогиба образца)

Видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными для соответствующих распределений проводимости. Зависимость проекции вносимого напряжения, полученная для равномерного изменения проводимости, существенно отличается по наклону к оси и не может быть совмещена с экспериментальными данными масштабированием. Это позволяет сделать вывод о том, что полученное распределение сигнала преобразователя в частотной области однозначно характеризует распределение свойств по глубине.

Совпадение данных для двух значений стрелы прогиба подтверждает линейный характер связи напряжений с изменением проводимости в упругой области, а также возможность калибровки чувствительности на образцах с известными значениями электрической проводимости.

Заключения

Подтверждена возможность оценки распределения электрических свойств по глубине объекта контроля с помощью вихретокового метода.

Проведено успешное экспериментальное опробование оценки механических напряжений по глубине нагруженной пластины из титанового сплава.

Показано, что направление механических напряжений влияет на знак приращения проводимости. Наличие знакопеременных напряжений в контролируемом образце может приводить к взаимной компенсации изменения вносимого напряжения преобразователя от различных слоев.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
2. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Уткин Д.А. Методы определения механических характеристик материалов с помощью индентирования (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // *Электрометаллургия*. 2022. № 1. С. 2–12.
4. Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Шарапкин Д.С. Комплекс механических и эксплуатационных свойств катаных заготовок из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
5. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Влияние внутренних напряжений на старение полимерных композиционных материалов (обзор) // *Механика композитных материалов*. 2021. Т. 57. № 5. С. 805–822.
6. Подживотов Н.Ю. Минимальные объемы выборок для оценки начальных моментов распределения предела прочности при растяжении образцов металлических конструкционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 17.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-103-114.
7. Пичугин С.С., Шитиков В.С., Головков А.Н. Неразрушающие методы оценки остаточных напряжений // *Труды ВИАМ*. 2024. № 1 (131). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
8. Шитиков В.С., Пичугин С.С., Кудинов И.И. Анализ возможности оценки остаточных напряжений вихретоковым методом неразрушающего контроля // *Электрометаллургия*. 2024. № 2. С. 22–28. DOI: 10.31044/1684-5781-2024-0-2-22-28.
9. Кекало И.Б. Физические свойства металлов. Раздел «Электрические свойства»: лабораторный практикум. М., 1998. 139 с.
10. Дорофеев А.Л., Любашев Г.А., Останин Ю.Я. Измерение толщины покрытий с помощью вихревых токов. М.: Машиностроение, 1975. 64 с.
11. Бакунов А.С., Герасимов В.Г., Останин Ю.Я. Вихретоковый контроль накладными преобразователями. М.: Моск. энерг. ин-т, 1985. 86 с.
12. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля / под ред. В.Е. Шатерникова. М.: Спектр, 2010. 256 с.
13. Автаев В.В., Котова Е.А., Гладких А.В., Бойчук А.С. Оснастка для испытаний на изгиб конструктивно-подобных образцов сварных гибридных панелей крыла // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-83-91.
14. ГОСТ 9.019–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые и магниевые. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание. М.: Изд-во стандартов, 1974. 18 с.
15. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.

References

1. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
2. Oreshko E.I., Erasov V.S., Yakovlev N.O., Utkin D.A. Methods for determining the mechanical characteristics of materials using indentation (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12.
4. Nochovnaya N.A., Shiryayev A.A., Sharapkin D.S. Complex of mechanical and operational properties of rolled blanks from metastable- β -titanium alloy VT47. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
5. Kablov E.N., Startsev V.O. Effect of internal stresses on the aging of polymer composite materials (review). *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 805–822.
6. Podzhivotov N.Yu. The minimum samples amounts for an assessment of the initial moments of distribution of tensile ultimate strength for the samples of structural metallic materials. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-103-114.
7. Pichugin S.S., Shitikov V.S., Golovkov A.N. Non-destructive methods for residual stress assessment. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
8. Shitikov V.S., Pichugin S.S., Kudinov I.I. Analysis of the Possibility of Estimating Residual Stresses by the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing. *Elektrometallurgiya*, 2024, no. 2. pp. 22–28. DOI: 10.31044/1684-5781-2024-0-2-22-28.
9. Kekalo I.B. *Physical Properties of Metals. Section «Electrical Properties»: Laboratory Workshop*. Moscow, 1998, 139 p.
10. Dorofeev A.L., Lyubashev G.A., Ostanin Yu.Ya. *Measuring Coating Thickness Using Eddy Currents*. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 64 p.
11. Bakunov A.S., Gerasimov V.G., Ostanin Yu.Ya. *Eddy current testing with clamp-on transducers*. Moscow: Mosk. Energ. In-t, 1985, 86 p.
12. Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. *Methods and devices of electromagnetic testing*. Ed. V.E. Shaternikov. Moscow: Spektr, 2010, 256 p.
13. Avtaev V.V., Kotova A.E., Gladkikh A.V., Boychuk A.S. Equipment for bending tests constructive and similar samples welded hybrid panels of the wing. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-83-91.
14. State Standard 9.019–74. *Unified system of protection against corrosion and aging. Aluminum and magnesium alloys. Methods of accelerated tests for stress corrosion cracking*. Moscow: Publ. House of Standards, 1974, 18 p.
15. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Handbook of strength of materials*. Kyiv: Naukova Dumka, 1988, 736 p.

Информация об авторах

Шитиков Владислав Сергеевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пичугин Сергей Сергеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav S. Shitikov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey S. Pichugin, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 16.07.2024; получена после доработки 23.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.08.2024.
The article was submitted 16.07.2024; received in revised form 23.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 30.08.2024.