

УДК 620.179.14

М.Г. Баширов

*Уфимский государственный нефтяной технический университет
филиал в г. Салавате, Россия*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Оборудование предприятий нефтепереработки работает в условиях действия механических напряжений, высоких температур и коррозионно-активных рабочих сред, инициирующих возникновение и накопление повреждений, приводящих со временем к нарушению его работоспособности. Процесс зарождения и накопления повреждений сопровождается изменением механических и электрофизических свойств металла конструкции. Современные методы механики деформируемого твердого тела позволяют прогнозировать долговечность конструкций на основе расчета напряженно-деформированного состояния для любой точки конструкции. Но для расчета напряженно-деформированного состояния необходимо точное знание всех термомеханических режимов эксплуатации либо текущей диаграммы нагружения. Знание исходных на момент изготовления конструкции механических свойств металла недостаточно, так как они в процессе эксплуатации существенно изменяются. Проведение стандартных механических испытаний на действующей конструкции невозможно, поэтому в настоящее время расчет напряженно-деформированного состояния для оценки долговечности осуществляется с использованием данных о свойствах материала в исходном состоянии, что не обеспечивает необходимую точность.

Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено наличие взаимосвязи механических и электрофизических свойств металлов. В силу того, что электрофизические параметры сравнительно легко поддаются измерению, они широко применяются для контроля механических свойств металла оборудования. Поэтому для решения проблемы оценки текущего состояния и прогнозирования остаточного ресурса конструкций могут быть использованы связи между электрофизическими свойствами и определяющими уравнениями твердого тела. Установление этих связей позволяет оценивать текущие механические свойства элементов конструкций по измеренным электромагнитным параметрам, а затем,

используя расчетный аппарат механики, осуществить прогноз долговечности элементов конструкции [1].

Корреляционная связь между механическими и электрофизическими свойствами может быть представлена моделью вида

$$CY = DX, \quad (1)$$

где Y – n -мерный вектор контролируемых механических параметров;

X – m -мерный вектор измеряемых электромагнитных параметров;

C и D – матрицы постоянных коэффициентов – параметров модели.

Выбор класса функциональной зависимости, аппроксимирующей матрицу данных, осуществляется из соображений сохранения физического соответствия математической модели реальному объекту [2]. Таким образом, механические параметры объекта могут быть определены по совокупности измеренных электрофизических параметров. В качестве электрофизических параметров в математических моделях обычно выступают коэрцитивная сила H_c , удельное электрическое сопротивление ρ , относительная магнитная проницаемость μ , остаточная индукция B_r , намагниченность насыщения M_s и другие параметры. Но для измерения совокупности этих параметров необходимо применение разнообразных приборов, установок и датчиков, что делает практически невозможным использование многопараметровой модели для экспресс-оценки технического состояния оборудования в производственных условиях. Поэтому несомненный интерес вызывают исследования, направленные на уменьшение числа диагностических параметров при одновременном повышении их информативности. В данной работе рассматривается возможность использования пространственных и временных гармонических составляющих вторичного электромагнитного поля, получаемого при сканировании поверхности объекта низкочастотным гармоническим электромагнитным полем, для определения уровня и характера накопления повреждений и оценки остаточного ресурса эксплуатации оборудования. Взаимосвязанное изменение механических и электрофизических свойств металла оборудования в процессе накопления повреждений по-разному влияет на разные гармонические составляющие спектра отраженного электромагнитного поля. Современная компьютерная техника позволяет в реальном масштабе времени анализировать большое число гармонических составляющих, выявлять различные варианты отклонений состояния металла оборудования от исходного состояния и идентифицировать повреждения. Носителями информации являются амплитуда и фаза гармонических составляющих.

Для анализа параметров гармонических составляющих сигнала электромагнитного преобразователя была использована система спектрального анализа SpektraLAB. Система позволяет работать в

реальном масштабе времени в среде WINDOWS, имеется возможность записи исследуемого сигнала для дальнейшей обработки и анализа. Система SpektraLAB работает в комплекте с платой сопряжения, содержащей два канала аналого-цифрового преобразования (АЦП) и два канала цифро-аналогового преобразования (ЦАП), обеспечивающих дискретизацию сигнала на периоде $N = 1024$ и квантование по уровню $R = 16$ разрядов. Диапазон исследуемых частот составил от 5 Гц до 44 кГц. Система позволяет сформировать сигналы произвольной формы – от прямоугольных до гармонических. Электромагнитные преобразователи подключаются к персональному компьютеру (ПК) через плату сопряжения. Сигналы, генерируемые системой, через ЦАП поступают в обмотки возбуждения электромагнитных преобразователей, а сигналы измерительных обмоток преобразователей через АЦП поступают в ПК для дальнейшей обработки.

Система SpektraLAB использовалась совместно с испытательными машинами УММ-5, УММ-50, КМ -50-1 и установкой для испытания на малоцикловую усталость, разработанной на кафедре ОПНН Салаватского филиала УГНТУ. Механическим испытаниям подвергались цилиндрические образцы галтельного типа длиной 120 мм, диаметром 6 мм с концентратором напряжения в виде проточки в центральной части шириной и глубиной по 1 мм, а также плоские образцы длиной 200 мм, шириной 60 мм, толщиной 3, 6 и 8 мм, с концентратором напряжения в виде бокового пропила шириной 1мм, протяженностью 35 мм из наиболее широко применяемых в нефтехимическом машиностроении сталей марок: 20, 3сп, 40Х, 16ГС, 09Г2С, 12Х18Н10Т. При испытаниях использовались проходные и накладные трансформаторные электромагнитные преобразователи с дополнительной компенсационной обмоткой.

На рисунках 1 и 2 приведены зависимости амплитуд гармонических составляющих электромагнитных преобразователей от приложенных усилий при растяжении цилиндрических образцов до полного разрушения. На рисунке 3 представлены зависимости амплитуд гармонических составляющих сигнала преобразователя от угла закручивания цилиндрического образца. Исследуемые образцы подвергались нагружению с заданным шагом, при этом осуществлялась запись всех параметров выходного сигнала преобразователя для дальнейшей обработки и анализа. Использовалась возможность фильтрации записанных сигналов от низкочастотных и высокочастотных помех.

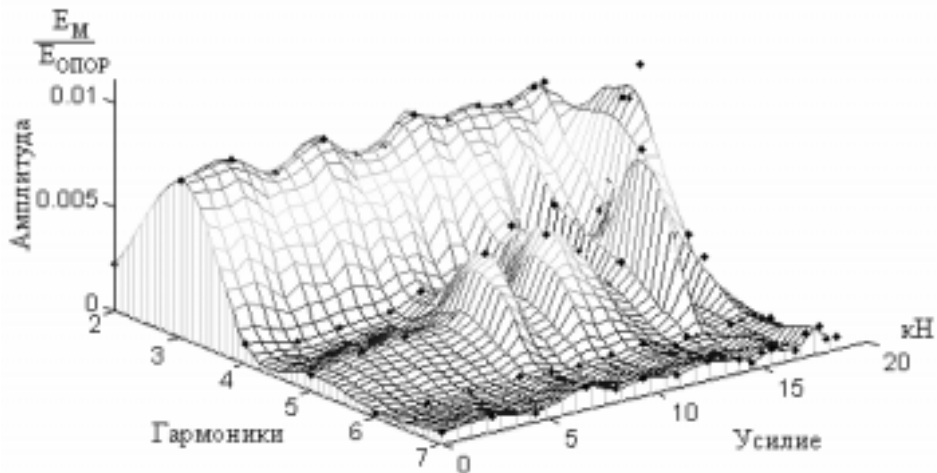


Рисунок 1 – Зависимость амплитуд гармонических составляющих спектра сигнала преобразователя при растяжении цилиндрического образца из стали марки 40X

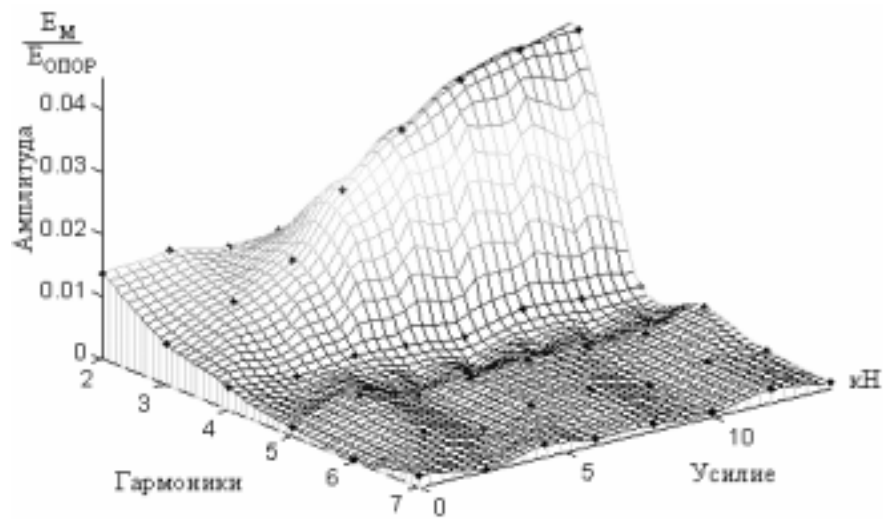


Рисунок 2 – Зависимость амплитуд гармонических составляющих спектра сигнала преобразователя при растяжении цилиндрического образца из стали марки 12X18H10T

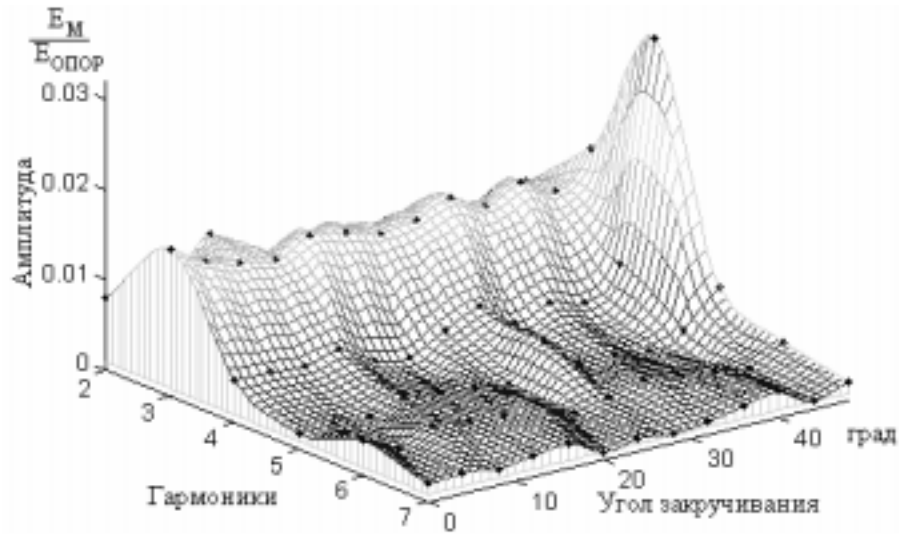


Рисунок 3 – Зависимость амплитуд гармонических составляющих спектра сигнала преобразователя при кручении цилиндрического образца из стали марки 3сп

Для исследования параметров гармоник сигнала при растяжении плоских образцов с концентратором напряжения – боковым пропилом, на поверхность образца была нанесена сетка, в узлах которой производились измерения. Сначала измерения производились на ненагруженных образцах, а затем образцы подвергались растяжению с записью параметров сигнала во всех отмеченных точках.

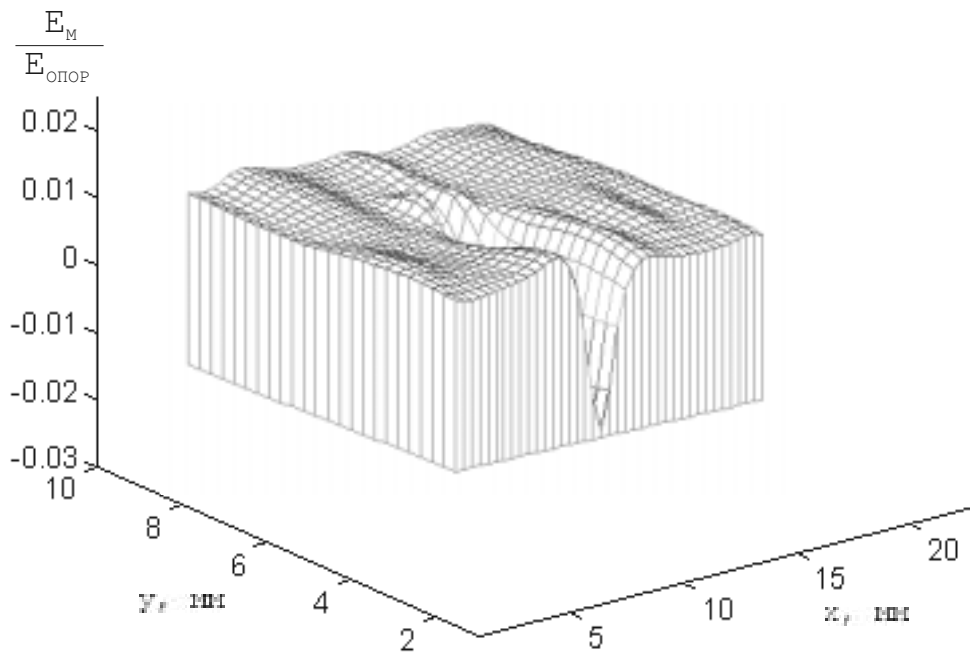


Рисунок 4 – Рельеф амплитуды 1-ой гармоники на поверхности плоского ненагруженного образца

Для построения поверхности распределения амплитуд гармонических составляющих была разработана программа в системе MatLab. При этом были созданы матрицы параметров гармоник и координат точек, нанесенных на поверхность образца. По значениям матриц производилась интерполяция с помощью функции `griddata` [3]. Для примера на рисунке 4 показана картина распределения амплитуды I-ой гармоники вдоль поверхности ненагруженного образца из стали марки 16ГС, а на рисунке 5 соответственно для 3-ой гармоники.

В ненагруженном состоянии образца изменения гармонических составляющих незначительны. Это видно по рисункам 4 и 5.

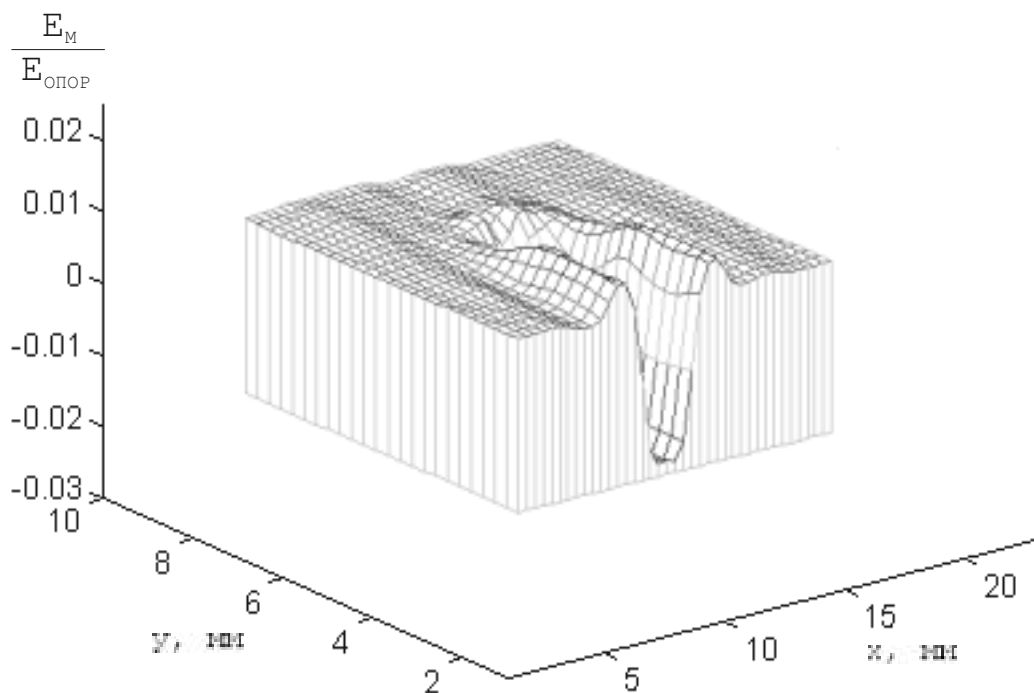


Рисунок 5 – Рельеф амплитуды 3-ой гармоники на поверхности плоского ненагруженного образца

Значительные изменения присутствуют у краев пропила, что связано с влиянием краевого эффекта. Как видно, амплитуды различных гармоник по разному реагируют на неоднородности поверхности и внутренней структуры образца. После приложения нагрузки отклик в зоне зарождения трещины присутствует у всех гармоник.

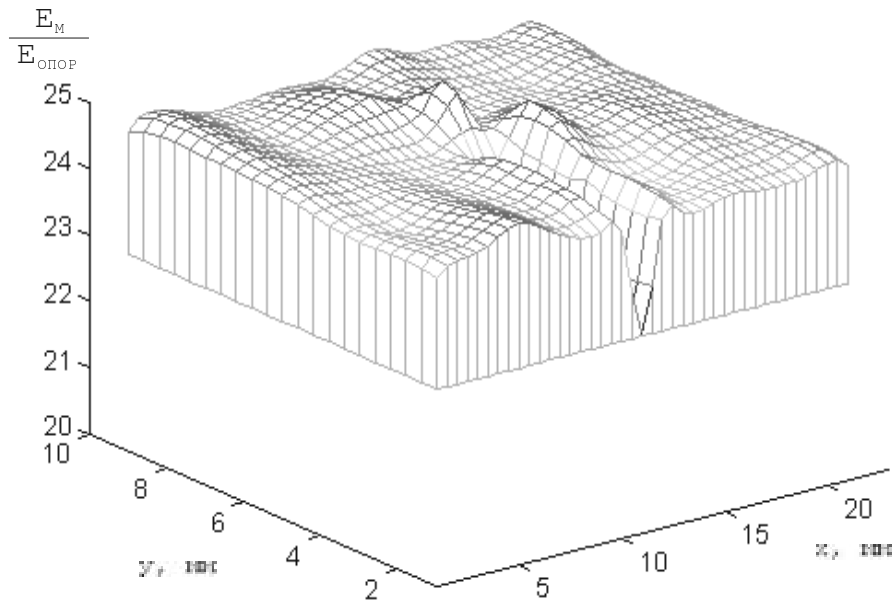


Рисунок 6 – Рельеф амплитуды 1-ой гармоники на поверхности плоского нагруженного образца

Максимальное увеличение амплитуд гармоник наблюдается там, где по результатам расчета напряженно-деформированного состояния существует наибольшая плотность силовых линий механического напряжения. Именно в этих местах начинают зарождаться трещины.

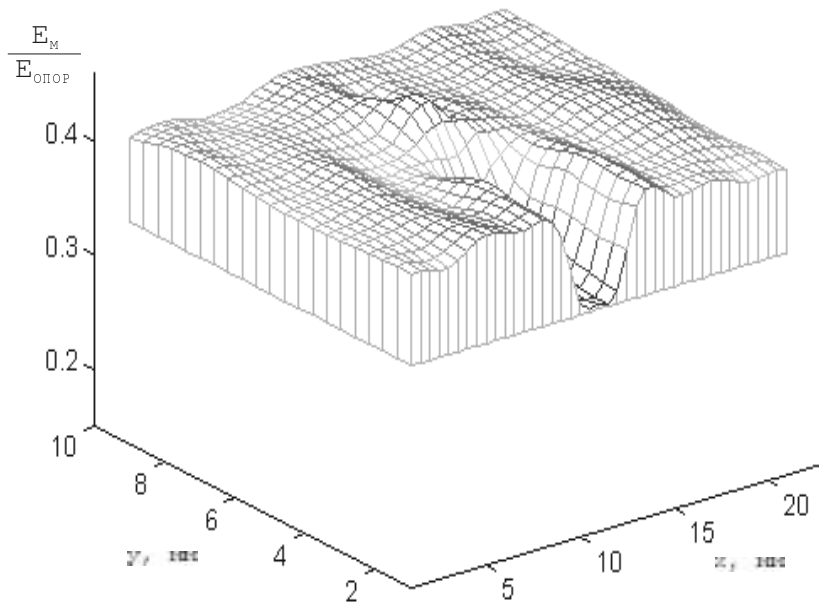


Рисунок 7 – Рельеф амплитуды 3-ой гармоники на поверхности плоского нагруженного образца

Как видно из рисунка 6, зарождение трещины происходит не по осевой линии, а со смещением вправо, причем на картине присутствуют два экстремума. Как показало детальное обследование образца, в этом месте зародились две трещины.

Для оценки состояния и прогнозирования остаточного ресурса оборудования электромагнитными методами, при наличии большого количества связанных между собой электрофизических параметров, наиболее целесообразно применять метрические модели многопараметрового электромагнитного неразрушающего контроля [2].

Цель статистических решений таких задач в условиях производства заключается в построении многомерных корреляционных моделей, связывающих параметры объекта контроля с сигналами измерительного преобразователя. Полученные модели в дальнейшем используются для оценки параметров реальных объектов контроля.

В качестве диагностических параметров прогнозирования остаточного ресурса оборудования можно использовать изменение параметров гармонических составляющих сигнала измерительного преобразователя. Из параметров гармонических составляющих формируется признаковое пространство. Измеренные параметры p гармонических составляющих, соответствующих текущему состоянию материала изделия, представляются векторами

$$(\mathbf{V}_1; \mathbf{V}_2; \dots; \mathbf{V}_p). \quad (2)$$

Состояние материала в многомерном пространстве описывается результирующим вектором \mathbf{V} , который представляет собой сумму векторов типа (2)

$$\mathbf{V} = [A(m), B(n), C(l)], \quad (3)$$

где $A(m)$, $B(n)$, $C(l)$ – соответственно параметры гармонических составляющих электромагнитного поля, параметры механических или электрофизических свойств и структура связей между ними.

По результатам измерений механических параметров и информационных параметров гармонических составляющих электромагнитного поля строится эталонная математическая модель – образ исходного, т. е. исправного, состояния оборудования, представляющая собой многомерный вектор \mathbf{V}_0 . Затем по результатам механических испытаний в этом же пространстве определяется поверхность предельного состояния оборудования $\mathbf{S}_п$, формируемая векторами $\mathbf{V}_{1п}$, $\mathbf{V}_{2п}$, ..., $\mathbf{V}_{рп}$, соответствующими предельным

механическим параметрам. В соответствии с теорией распознавания образов техническое состояние оборудования и остаточный ресурс идентифицируются как функции отклонения вектора текущего состояния от вектора эталонной модели \mathbf{V}_0 и расстояния до поверхности предельного состояния. Таким образом, в качестве параметра диагностирования может быть использовано расстояние L отклонения вектора текущего состояния материала от эталонного вектора или расстояние до поверхности критического состояния.

Расстояние между вектором текущего состояния материала образца и вектором-эталонном рассчитывается по выражению [4]

$$L(\mathbf{V}, \mathbf{V}_0) = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0| = \left[\sum_{j=1}^p (V_j - V_{0j})^2 \right]. \quad (4)$$

Чтобы учесть анизотропность пространства признаков вводится весовой вектор

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p). \quad (5)$$

С помощью компонентов весового вектора, можно учесть различную диагностическую ценность признаков, придавая большие значения наиболее значимым признакам. Введение весовых коэффициентов деформирует пространство признаков. Если поставить условие, чтобы при подобных деформациях сохранился объем областей диагнозов, то вводится условие нормирования в виде

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_p = \prod_{j=1}^p \lambda_j = 1. \quad (6)$$

Таким образом, для оценки состояния металла оборудования будем использовать расстояние между вектором текущего состояния металла и вектором-эталонном в пространстве признаков, образованном параметрами гармонических составляющих сигнала электромагнитного преобразователя. В дальнейшем будем называть этот вектор вектором поврежденности.

С помощью специально разработанной программы по экспериментально измеренным значениям параметров гармоник в узлах сетки, нанесенной на поверхность плоского образца с боковым пропилом, рассчитали картину распределения модуля вектора поврежденности по

поверхности образца. На рисунке 8 представлена картина распределения модуля вектора поврежденности по поверхности плоского образца при нагружении в области упругой деформации. Из рисунка видно, что при малых нагрузках отклонения вектора поврежденности незначительны, но при этом в месте расположения концентратора напряжения заметны отклонения, что совпадает с результатами расчета напряженно-деформированного состояния.

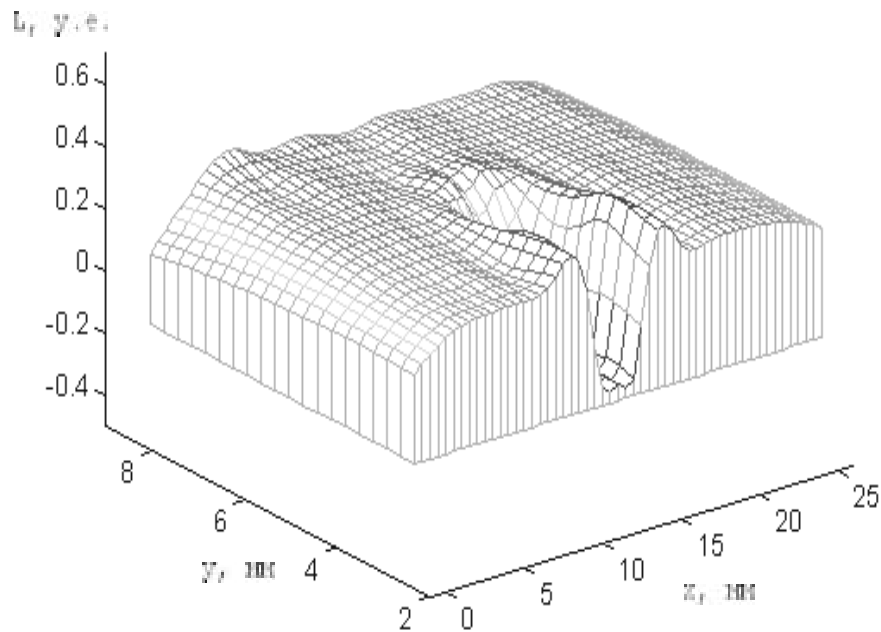


Рисунок 8 – Рельеф модуля вектора поврежденности на поверхности плоского образца в области упругих деформаций

На рисунке 9 представлена картина распределения вектора поврежденности на поверхности образца из стали 16ГС при нагружении до возникновения трещин. В отличие от картины, изображенной на рисунке 8, значения вектора поврежденности на рисунке 9 значительно возросли в местах зарождения трещин.

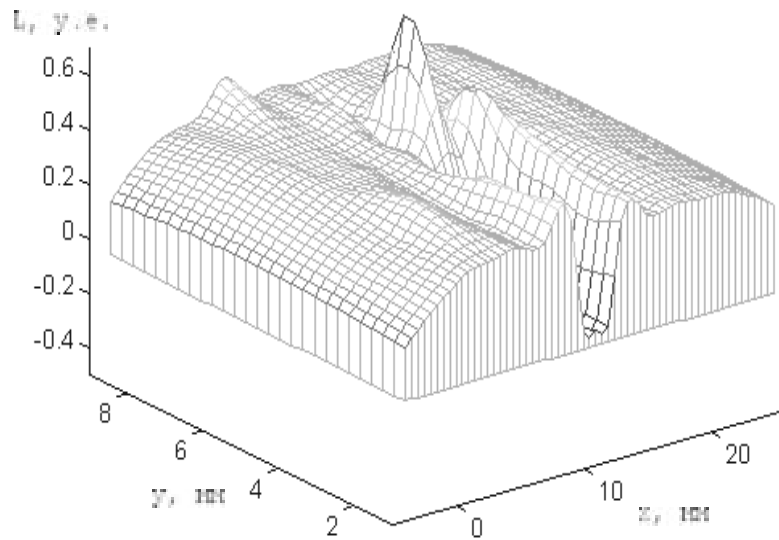


Рисунок 9 – Рельеф модуля вектора поврежденности на поверхности плоского образца в области пластических деформаций

Распределение вектора поврежденности на поверхности объекта контроля можно с помощью многоэлементного электромагнитного преобразователя и видеоконтрольного устройства представить в виде многоцветного двухмерного изображения и таким образом решить задачу визуализации картины распределения механических напряжений, выявить участки с повышенными, предельными и критическими значениями механических напряжений. На рисунке 10 изображена картина распределения расстояния отклонения вектора текущего состояния материала образца от положения эталонного вектора по поверхности испытуемого плоского образца в области упругих деформаций.



Рисунок 10 - Визуализация топографии модуля вектора поврежденности на поверхности плоского образца в области упругих деформаций

На рисунке 11 представлена картина распределения расстояния от вектора текущего состояния материала до поверхности критического состояния материала образца в области пластических деформаций.



Рисунок 11 - Визуализация топографии модуля вектора поврежденности на поверхности плоского образца в области пластических деформаций

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Горкунов Э.С., Федотов В.П., Бухвалов А.Б., Веселов И.Н. Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик. - Дефектоскопия, 1997, №4, с. 87-95.
- 2 Дрейзин В.Э. О статистическом подходе к решению многопараметровых метрических задач неразрушающего контроля. – Дефектоскопия, 1981, №3, с. 5 – 13.
- 3 Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATLAB 5.0/5.3. Система символьной математики. – М.: Нолидж, 1999. – 617 с.
- 4 Биргер И.А. Техническая диагностика. - М.: Машиностроение, 1978. - 240 с.