

**ОЦЕНКА РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ  
МЕТОДОМ ДИАГНОСТИКИ**

Баширов М.Г., Кузеев И.Р.

*(Уфимский государственный нефтяной технический университет)*

Задача обеспечения промышленной безопасности в условиях продолжающегося физического и морального износа оборудования на опасных производственных объектах Российской Федерации обуславливает повышение роли методов и средств диагностики. Использование оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, работающего с взрыво-, пожароопасными и токсичными средами при избыточном давлении и высоких температурах, срок эксплуатации которого значительно превышает нормативный, потенциально опасно и увеличивает вероятность возникновения аварийных ситуаций. При этом аварии могут приводить к человеческим жертвам, отравлениям, загрязнению окружающей среды и большим экономическим потерям, в связи с чем очень важно определять научно обоснованными методами техническое состояние и возможность безопасной эксплуатации оборудования за пределами нормативного срока. Неразрушающий контроль является инструментом экспертизы промышленной безопасности, поэтому достоверность оценки технического состояния оборудования во многом определяется применяемыми средствами неразрушающего контроля.

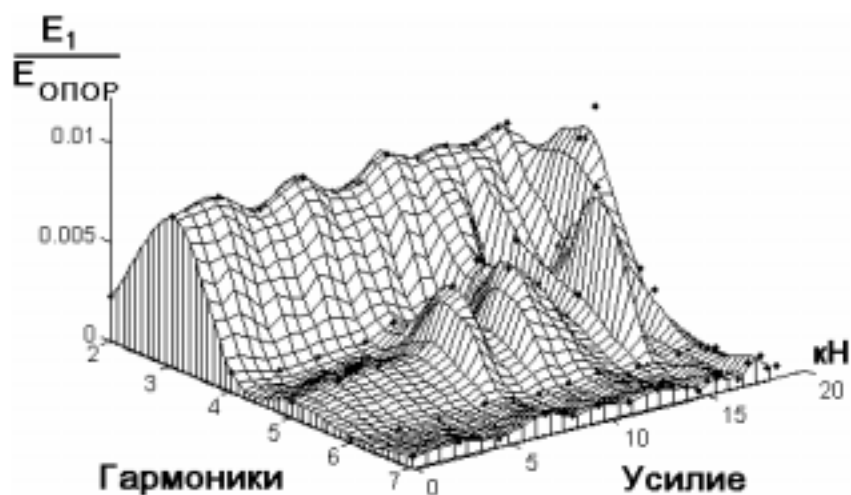
Анализ аварийности и травматизма на предприятиях нефтепереработки показывает [1], что в каждом третьем случае причиной аварии служит техническое устройство. Более детальный анализ показывает, что основными причинами отказов явились либо медленно прогрессирующие повреждения типа коррозионного или эксплуатационного износа, либо повреждения в результате некачественного ремонта, применения несоответствующих условиям эксплуатации или неисправных комплектующих изделий, нарушения технологии сварки. Данные повреждения могли бы быть своевременно выявлены при наличии соответствующих средств

неразрушающего контроля. Несмотря на широкий спектр выпускаемых промышленностью средств неразрушающего контроля и диагностики, большого количества разработанных методов прогнозирования, проблема объективной и надежной оценки технического состояния и прогнозирования ресурса опасных производственных объектов на сегодняшний день не решена. Данная ситуация послужила причиной разработки и утверждения Госгортехнадзором России «Концепции управления Системой неразрушающего контроля и основных направлений ее развития». В данном документе указывается на необходимость организации программных исследований в области развития неразрушающих методов контроля, разработки и реализации мероприятий, направленных на повышение промышленной безопасности подконтрольных Госгортехнадзору России объектов на основе широкого использования методов неразрушающего контроля.

Для решения задачи обеспечения безопасности эксплуатации оборудования нефтеперерабатывающих предприятий необходимы высокопроизводительные, высокоинформативные средства неразрушающего контроля. Перспективными для контроля крупногабаритного оборудования нефтепереработки являются электромагнитные методы, которые являются бесконтактными, позволяют получать первичную информацию в виде электрических сигналов. Механические и электрофизические свойства материалов «закладываются» на уровне структуры и взаимосвязаны. Все изменения в структуре материала в процессе деформирования-разрушения, зарождение и развитие микрповреждений отражаются в соответствующих изменениях электрофизических параметров. Совокупность доменов и междоменных границ составляет доменную структуру магнитного материала. Взаимодействием этой структуры с дефектами кристаллической решетки и с макроскопическими дефектами определяются все структурно-чувствительные свойства магнитных материалов. Наличие внутренних напряжений приводит к изменению энергии междоменной границы. При наличии дефектов структуры в виде включений возникают поля рассеяния, образуя доменную субструктуру. Магнитный поток обтекает включения, и внутри домена образуются малые домены и, соответственно, дополнительные междоменные границы. При росте одних доменов за счет других происходит

переход границы через включение, что сопровождается увеличением поверхностной энергии. Макроскопические поры действуют так же, как и неферромагнитные включения. В процессе упругих и пластических деформаций ферромагнетика

доменная структура претерпевает значительные изменения. Одноосные упругие деформации приводят к существенной перестройке типа магнитной структуры, изменяют размеры отдельных доменов и вид междоменных границ. Такая

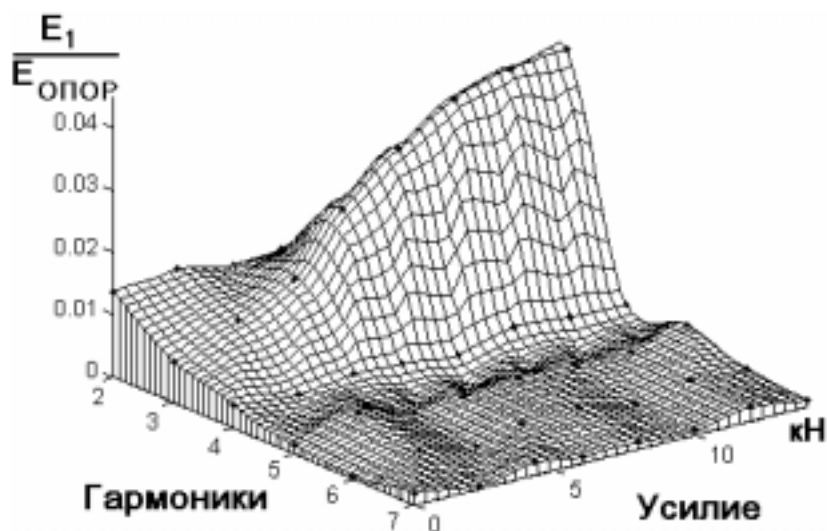


**Рис. 1. Рельеф амплитуд гармонических составляющих сигнала преобразователя при растяжении образца из стали марки 40X**

перестройка структуры существенно изменяет электромагнитные характеристики материала - величины продольной и поперечной магнитострикции, вихретоковых и полных магнитных потерь, магнитной проницаемости и др. Пластическая деформация, внося в ферромагнетик дефекты кристаллической структуры, измельчает магнитную доменную структуру, то есть затрудняет процессы смещения основных доменных границ [2]. При этом характер возникающих дефектов и особенности их распределения в кристалле обуславливают соответствующие изменения электрофизических свойств. Любое воздействие на металл, приводящее к увеличению в нем дефектов кристаллического строения, приводит к увеличению электрического сопротивления. Таким образом, изменения электрофизических свойств металлов при действии нагрузок соответствуют изменениям в структуре и накоплению повреждений.

Бесконтактное измерение взаимосвязанных механических и электрофизических параметров металлов обычно осуществляется электромагнитными методами с помощью электромагнитных преобразователей.

Так как спектр гармонических составляющих сигнала электромагнитного преобразователя отображает более тонкое строение формы индуктируемой ЭДС, то параметры спектра являются более информативными, чем классические магнитные характеристики или первые гармоники ЭДС. Анализ общих закономерностей взаимосвязи механических и электрофизических свойств металлов с параметрами гармонических составляющих вторичного электромагнитного поля, проведенный на основе системы уравнений Максвелла, описывающих внешнее электромагнитное поле в пространстве вокруг преобразователя, показывает возможность их использования в задачах диагностики и прогнозирования ресурса оборудования [3].



**Рис. 2. Рельеф амплитуд гармонических составляющих сигнала проходного преобразователя при растяжении образца из стали марки 12Х18Н10Т**

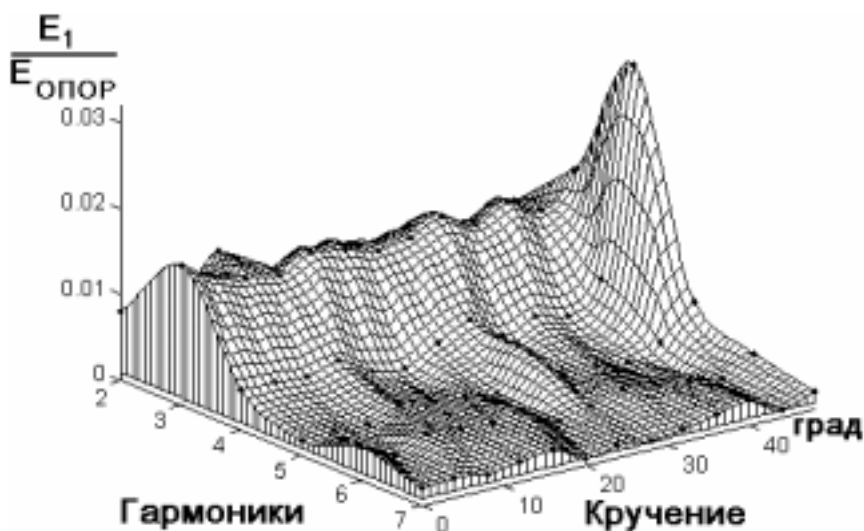
Для исследования зависимости параметров гармонических составляющих вторичного электромагнитного поля от уровня и характера повреждений структуры металла, был разработан компьютеризированный исследовательский комплекс, состоящий из стандартной испытательной

машины и автоматической измерительной системы. Связь электромагнитных измерительных преобразователей с измерительной системой осуществляется через плату сопряжения TP-805 фирмы Ti-Pi, которая содержит аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи и анализатор спектра. Для обработки информации использовался программный комплекс Spectralab фирмы Sound Technology Inc. Испытанию подвергались цилиндрические образцы с размерами: длина рабочей части - 100 мм; диаметр - 6 мм; концентратор напряжения - круговая проточка шириной 1 мм, глубиной 0,7 мм. Плоские образцы с размерами: длина - 200 мм; ширина - 60 мм; толщина 8 мм. Концентратор напряжения - боковой пропил в

средней части образца протяженностью 33 мм, раскрытием 2,5 мм. При испытаниях на циклическую нагрузку использовали плоские образцы сечением 2х3 мм и длиной рабочей части 60 мм. В качестве материалов-представителей взяты наиболее широко применяемые в нефтяном машиностроении углеродистые, низколегированные и нержавеющие стали.

На рисунке 1 приведены зависимости амплитуд гармонических составляющих сигнала проходного электромагнитного преобразователя при растяжении цилиндрического образца из стали марки 40Х до полного разрушения. Как видно из рисунка, разные гармонические составляющие по-разному реагируют на приложенную нагрузку, но в

совокупности они характеризуют состояние материала при конкретной нагрузке. Аналогичные исследования были проведены для углеродистых, низколегированных и нержавеющих сталей при растяжении, сжатии и кручении цилиндрических образцов, при растяжении



**Рис. 3. Рельеф амплитуд гармонических составляющих сигнала преобразователя при кручении образца из стали марки Ст3**

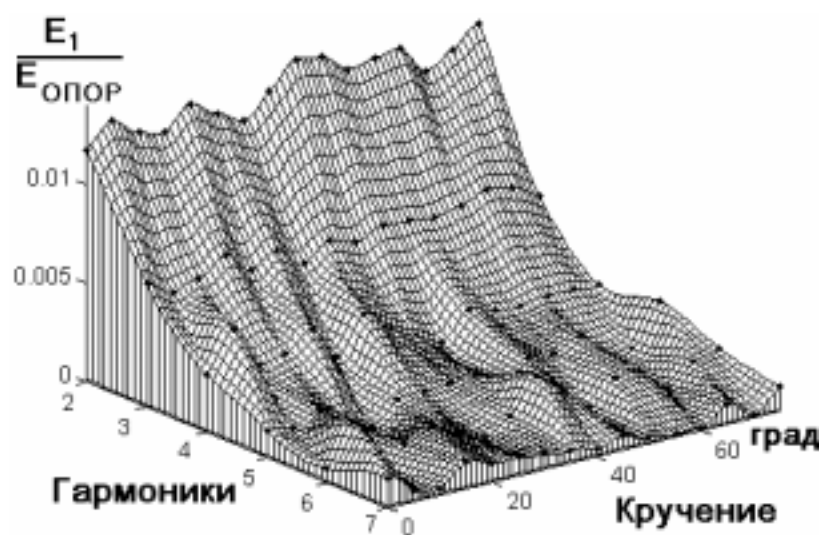
и циклических нагрузках плоских образцов. Соответствующие диаграммы приведены на рисунках 2-4.

Анализ изменения гармонических составляющих спектра сигнала электромагнитного преобразователя при различных схемах нагружения образца показывает, что деформация сдвига увеличивает первую и четные гармоники, а нормальные напряжения вызывают увеличение нечетных гармоник выше первой. При больших продольных нагрузках на стержень начинается перераспределение напряжений, что отражается в увеличении первой и четных гармоник сигнала преобразователя. Когда касательные напряжения достигают определенного

значения, третья гармоника резко уменьшается. Это явление может быть использовано в качестве физического критерия потери устойчивости в задачах прогнозирования ресурса оборудования.

Различные изменения параметров гармоник отражают иерархичность и многостадийность процессов разрушения материалов. Каждую стадию можно идентифицировать совокупностью параметров гармонических составляющих спектра сигнала электромагнитного преобразователя.

Сопоставление рельефа амплитуд гармонических составляющих с диаграммой нагружения образцов из этих металлов показывает, что каждая точка на кривой нагружения могут быть отображена совокупностью соотношений амплитуд и фаз гармонических составляющих сигнала электромагнитного преобразователя.



**Рис. 4. Рельеф амплитуд гармонических составляющих сигнала преобразователя при кручении образца из стали марки 12Х18Н10Т**

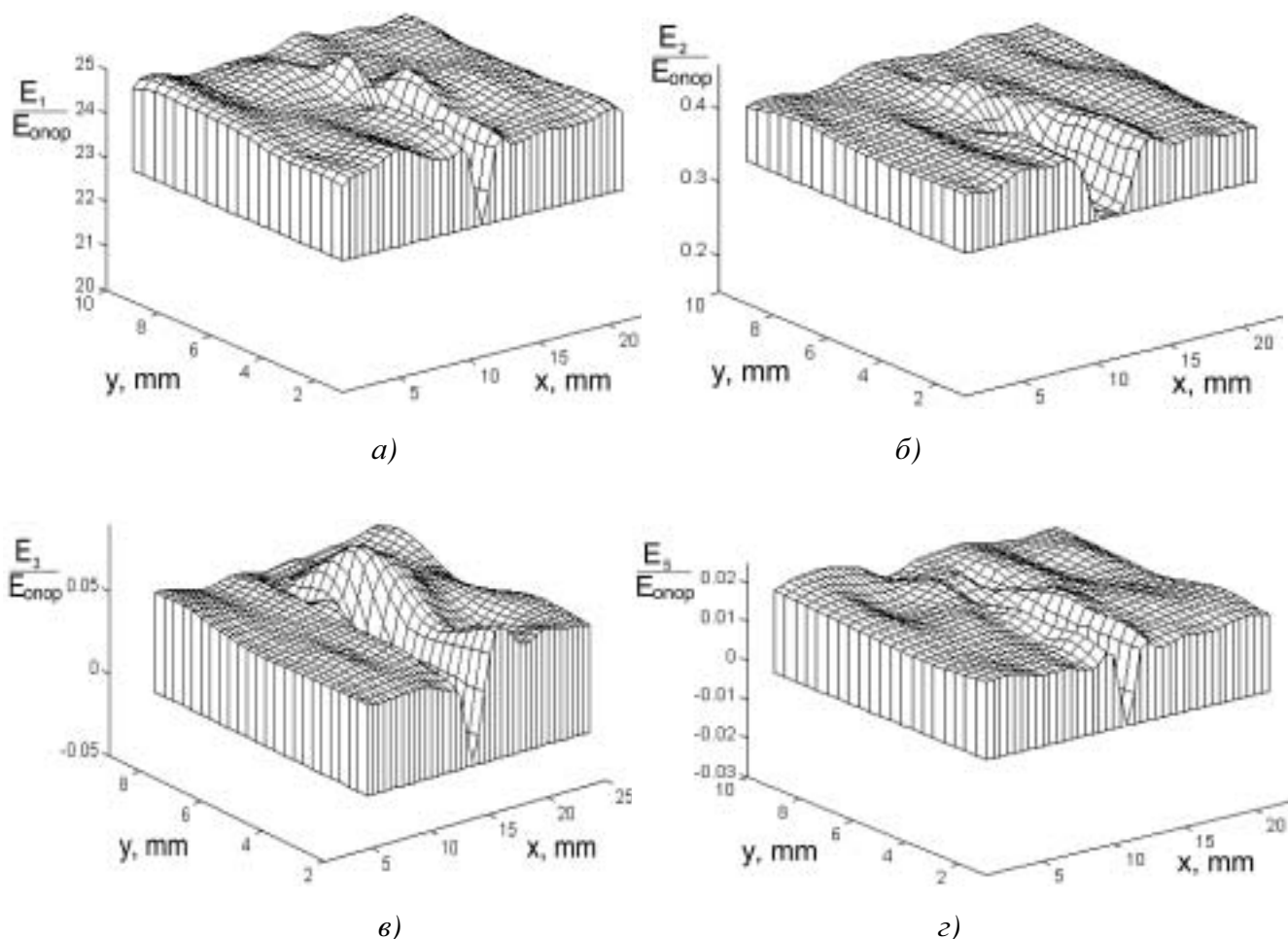
Для исследования параметров гармоник сигнала при растяжении плоских образцов с концентратором напряжения – боковым пропилом использовались накладные локальные электромагнитные преобразователи. На поверхность образца была нанесена сетка, в узлах которой производились измерения. Сначала

измерения производились на ненагруженных образцах, а затем образцы подвергались растяжению и записывались параметры сигнала во всех отмеченных точках. Полученные сигналы раскладывались в ряд Фурье и измерялись амплитуды и фазы гармонических составляющих.

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 стандартного приложения системы MatLab - функции `griddata`. На рисунке 5 показаны картины распределения амплитуд 1-й, 2-й, 3-й и 5-й гармоник вдоль поверхности плоского нагруженного образца из стали 17ГС с концентратором напряжения в виде бокового пропила.

В ненагруженном состоянии образца изменения амплитуд гармонических составляющих незначительны, изменения наблюдаются у краев пропила, что связано с влиянием краевого эффекта. После приложения усилия 35 кН формируется рельеф распределения параметров гармонических составляющих по поверхности испытуемого образца.



**Рис. 5. Топография распределения амплитуд гармонических составляющих сигнала накладного вихретокового преобразователя при сканировании поверхности нагруженного плоского образца с концентратором напряжения в виде бокового пропила:**

*а* - амплитуда 1-й гармоники; *б* - 2-й гармоники; *в* - 3-й гармоники; *з* - 5-й гармоники

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. Значения амплитуд гармоник взяты в безразмерном виде относительно действующего значения опорного сигнала компенсационной обмотки.

При применении электромагнитных методов диагностики для анализа изменения свойств испытуемого объекта используются вихревые токи. С их помощью находят нарушения сплошности, оценивают химический состав металла, устанавливают металлографическую структуру основного металла, определяют величину зерна, структурных включений, химико-термического воздействия на поверхностные слои сталей, измеряют упругие константы, твердость сталей, прочность, различного вида внутренние напряжения, в том числе остаточные, и т. д. [4]. Кроме того, метод позволяет анализировать кинетику потери устойчивости стальных стержней произвольной формы, усталостных процессов в образцах, нагруженных циклически, измерять усилия и крутящие моменты в стержнях, выявлять остаточные напряжения в стальных листах после их сварки и интеркристаллитную коррозию, оценивать вязкостное трение в сталях, измерять толщину покрытий и геометрические размеры объекта, прогнозировать потерю устойчивости элементов металлических конструкций, усталостное разрушение и многое другое. Универсальность метода обусловлена тем, что все реологические, магнитные и электрические свойства - производные электродинамических полей. Электроны вихревого потока, перемещаясь по этим полям, воспринимают информацию о них. Они пересекают кристаллические и металлографические структуры, дислокационные и доменные поля, спонтанно образующиеся замкнутые области реологических структур, огибают нарушения сплошности. Носителями информации о свойствах объекта являются параметры гармонических составляющих вторичного электромагнитного поля, возбуждаемого вихревыми токами. Вторичное электромагнитное поле наводит ЭДС в измерительной обмотке вихретокового преобразователя.

Применение электромагнитного многопараметрового метрического метода диагностики позволяет в задачах оценки технического состояния и



прогнозирования ресурса оборудования перейти от качественной, часто интуитивной, оценки состояния объекта к количественной интегральной оценке [5]. Для этого из параметров гармонических составляющих формируется диагностическое пространство. Измеренные параметры  $p$  гармонических составляющих, соответствующих текущему состоянию материала изделия, представляются векторами

$$(V_1; V_2; \dots; V_p). \quad (1)$$

Состояние материала в многомерном пространстве описывается результирующим вектором  $V$ , который представляет собой сумму векторов типа (10)

$$V = [A(m), B(n), C(l)], \quad (2)$$

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  $V_0$ . Затем по результатам механических испытаний в этом же пространстве определяется поверхность предельного состояния оборудования  $S_{\Pi}$ , формируемая векторами  $V_{1\Pi}$ ,  $V_{2\Pi}$ , ...,  $V_{r\Pi}$ , соответствующими предельным механическим параметрам. В соответствие с теорией распознавания образов, техническое состояние оборудования и остаточный ресурс идентифицируются как функции отклонения вектора текущего состояния от вектора эталонной модели  $V_0$  или расстояния до поверхности предельного состояния  $S_{\Pi}$ .

Расстояние между диагностическим вектором и вектором-эталоном рассчитывается по выражению

$$L(V, V_0) = |V - V_0| = \left[ \sum_{j=1}^p (V_j - V_{0j})^2 \right]^{\mu/\nu}, \quad (3)$$

где  $\nu$  - порядок расстояния в диагностическом пространстве;

$\mu$  - степень расстояния в диагностическом пространстве.

Чтобы учесть анизотропность пространства признаков вводится весовой вектор

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p). \quad (4)$$

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

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_p = \prod_{j=1}^p \lambda_j = 1. \quad (5)$$

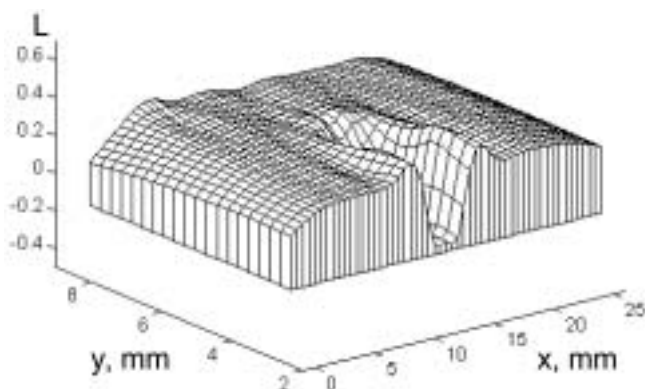
Таким образом, для оценки состояния металла оборудования используется безразмерный параметр  $L$ , являющийся функцией отклонения вектора текущего состояния от положения эталонного вектора или расстояния до поверхности предельного состояния. Величину этого отклонения будем называть параметром поврежденности  $L$ .

На рисунке 6 представлена картина распределения параметра поврежденности  $L$  по поверхности плоского образца из стали 17ГС при нагружении усилием 20 кН (область упругих деформаций). Из рисунка видно, что при малых нагрузках отклонения параметра поврежденности  $L$  по поверхности образца незначительны, но в месте расположения концентратора напряжения

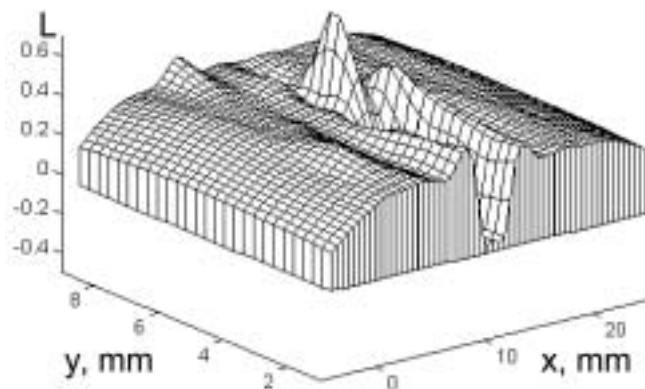
заметны отклонения, что совпадает с результатами расчета напряженно-деформированного состояния [6].

На рисунке 7 представлена картина распределения параметра поврежденности  $L$  на поверхности образца при нагружении до возникновения трещин (усилие 35 кН). В отличие от картины, изображенной на рисунке 6, значения параметра поврежденности  $L$  на рисунке 7 значительно возросли в месте зарождения трещины.

На рисунках 8-10 представлены графики изменения модуля вектора поврежденности в процессе накопления повреждений при различных режимах нагружения. При значительных напряжениях на графиках возникают точки



**Рис. 6. Рельеф параметра поврежденности  $L$  в области упругих деформаций**

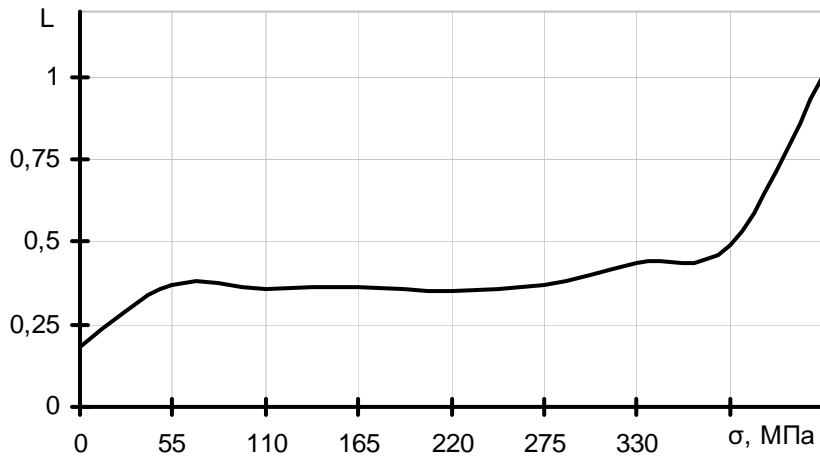


**Рис. 7. Рельеф параметра поврежденности  $L$  в области пластических деформаций**

перегиба. Эти изменения характера функции свидетельствуют об изменении в распределении нормальных напряжений ( $\sigma_{xx}$ ) по сечению образца. Дальнейшее развитие такого изменения в распределении напряжения по сечению образца приводит к потере устойчивости в упругой области деформации стержня из-за возникновения локальных пластических деформаций. Таким образом, точка перегиба на графике является предвестником будущей потери устойчивости стержня. Это явление может быть использовано для прогнозирования потери устойчивости стержня.

Электромагнитные методы позволяют напрямую исследовать механические свойства металлов, они дают полную информацию о реологических изменениях в них. Исследования показывают, что электромагнитным методом весьма точно

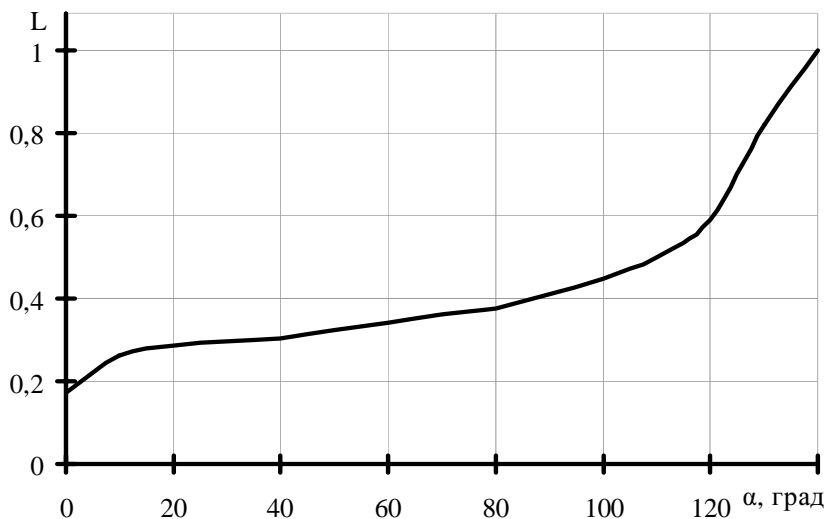
определяются предельные напряжения переходов из одного реологического состояния в другое. Все стадии зонно-статистической гипотезы потери



**Рис. 8. Изменение параметра повреждения  $L$  при растяжении (материал сталь 20)**

устойчивости отражаются на графиках изменения параметров гармонических составляющих сигнала электромагнитного преобразователя при нагружении образца, а через них на графике безразмерного параметра повреждения  $L$ . Эта закономерность

сохраняется как при квазистатических, так и при циклических переменных нагрузках. Для нормирования величины сигнала использовались две реперные точки – экспериментально определенные для конкретного материала значение

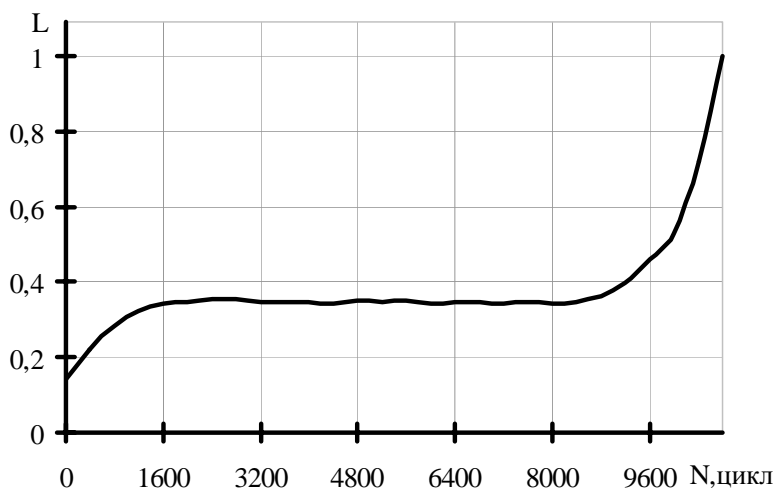


**Рис. 9. Изменение параметра повреждения  $L$  при кручении (материал сталь 10)**

параметра  $L$ , соответствующее предельному состоянию образца и значение параметра при отсутствии в зоне чувствительности преобразователя испытуемого образца. Верхнему значению, соответствующему предельному состоянию материала присваивается значение 1, значение 0 соответствует сигналу преобразователя при отсутствии образца.

Кривые  $L(\sigma_{xx})$  при нагружении образца до некоторого предельного значения

располагаются горизонтально. При дальнейшем увеличении нагрузки направление кривой резко изменяется – это начало потери устойчивости. На графике можно выделить пять участков, соответствующих пяти стадиям реологических изменений в металлах в процессе потери устойчивости. Анализ параметров кинетики процессов потери устойчивости позволяет установить закономерности, связывающие критические значения параметра  $L$ , соответствующие точкам перегиба характеристики, с механическими параметрами материала, полученными экспериментально. Связь между этими параметрами может быть выражена электромагнитным коэффициентом устойчивости  $K_{эу}$ . Зная электромагнитный коэффициент устойчивости и предел пропорциональности между электрофизическими и механическими параметрами, можно прогнозировать потерю устойчивости и рассчитывать допустимую нагрузку. Достоинством применения обобщенного параметра  $L$  является то, что каждый элемент конструкции можно перед монтажом или в процессе эксплуатации проверить на наличие опасного сечения и при малой нагрузке определить



**Рис. 10. Изменение параметра поврежденности  $L$  при симметричном циклическом нагружении (материал Ст 3)**

величину критического напряжения  $\sigma_{кр}$ .

При анализе усталостных процессов, так же, как и прочностных, выделяются пять стадий деформирования и пять видов внутренних остаточных напряжений. На основе анализа типичного семейства усталостных кривых и семейства реологических кинетик устанавливается закономерность взаимосвязи

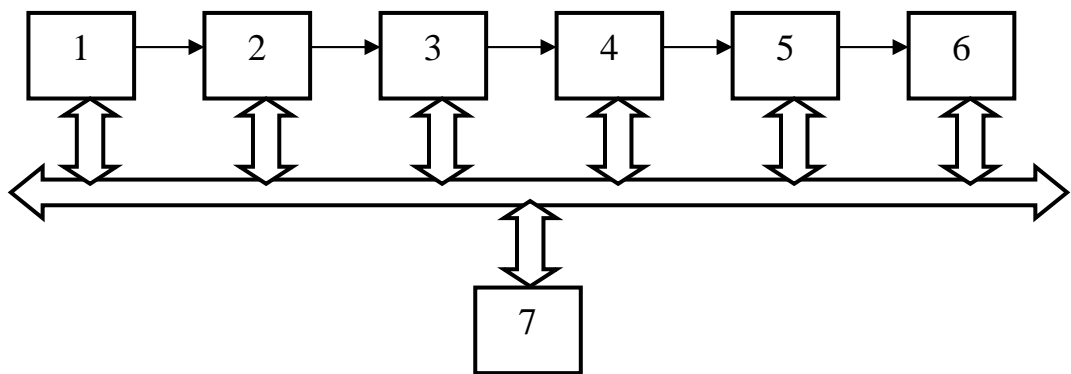
кинетических характеристик металлов с интегральным электромагнитным параметром поврежденности. Кинетика усталостных явлений и реологических процессов дают полную информацию о том, что предшествует разрушению металла.

Таким образом, вихретоковый метод позволяет оценивать всевозможные виды изменения внутренних и, в частности, остаточных напряжений в процессе испытаний или эксплуатации. Наиболее интенсивно они развиваются в окрестности поверхности, так как скин-эффект, т. е. неравномерное распределение плотности токов в испытуемом объекте обуславливает вынос информации электронами и электромагнитным полем именно из этих приповерхностных слоев металла.

Монотонный характер поведения параметра  $L$  в процессе деформирования-разрушения позволяет использовать его в задачах диагностики и прогнозирования ресурса оборудования в соответствии с РД 26.260.004-91 - Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации [7].

При неразрушающем контроле крупногабаритного оборудования предприятий нефтехимии и нефтепереработки актуальной проблемой является повышение производительности операции сканирования контролируемой поверхности. Повысить производительность контроля можно применением многоэлементных электромагнитных преобразователей, состоящих из большого числа однотипных элементарных преобразователей. Многоэлементные преобразователи позволяют визуализировать рельеф вторичного электромагнитного поля на поверхности объекта контроля. Распределение вектора поврежденности на поверхности объекта контроля можно с помощью многоэлементного электромагнитного преобразователя и видеоконтрольного устройства представить в виде многотонного двухмерного изображения, коррелирующего с картиной распределения механических напряжений и нарушений сплошности материала. Применение многоэлементных преобразователей, кроме того, позволяет решить проблему повышения производительности контроля крупногабаритного оборудования [8].

На рисунке 11 представлена структурная схема компьютеризованного электромагнитного устройства неразрушающего контроля с многоэлементным преобразователем, а на рисунке 12 - его внешний вид [9]. Устройство состоит из генератора 1, блока первичных преобразователей 2, предварительного усилителя 3, детекторного блока 4, мультиплексора 5, аналого-цифрового преобразователя 6 и микрокомпьютера 7.



**Рис. 11. Обобщенная структурная схема компьютеризированного электромагнитного прибора неразрушающего контроля**

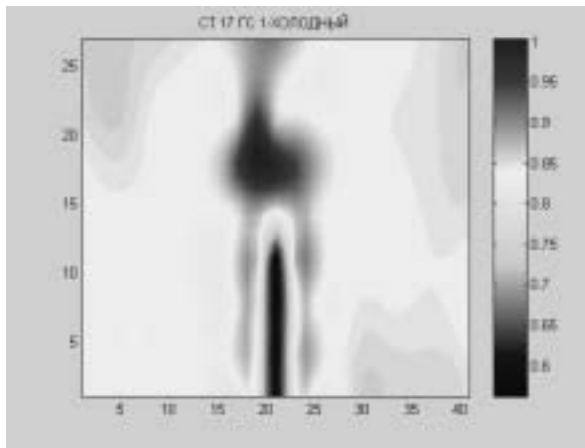
В составе микрокомпьютера (или могут быть подключены к нему через общую шину) следующие устройства: дисплей, принтер, специализированный процессор, блок автоматики и устройство сканирования. Все аналоговые блоки управляются микрокомпьютером через общую шину. Команды микрокомпьютера устанавливают амплитуду, частоту и форму кривой напряжения генератора, коэффициент усиления усилителя, производят опрос первичных преобразователей. Специализированный процессор применяется для быстрого преобразования Фурье или других, требующих

большого объема вычислений, функций, что позволяет разгрузить микрокомпьютер и вести достаточно сложный анализ сигнала в реальном масштабе времени.

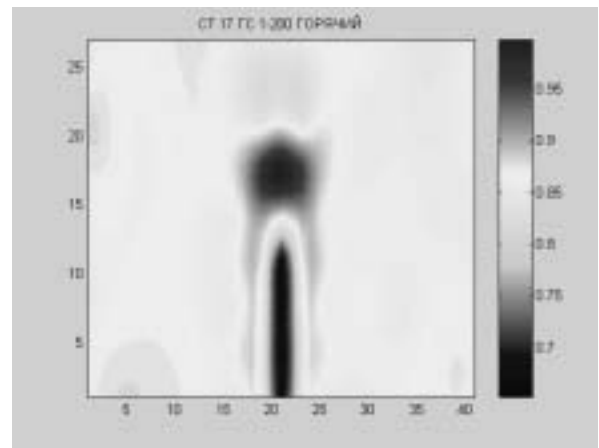


**Рис. 12. Электромагнитный интроскоп на базе персонального компьютера типа ноутбук**

На рисунках 13-14 приведены полученные методом электромагнитного многопараметрового метрического метода диагностики картины распределения параметра поврежденности  $L$  на поверхности плоского напряженно-деформированного образца с концентратором напряжения при температурах 20 °С и 200 °С.

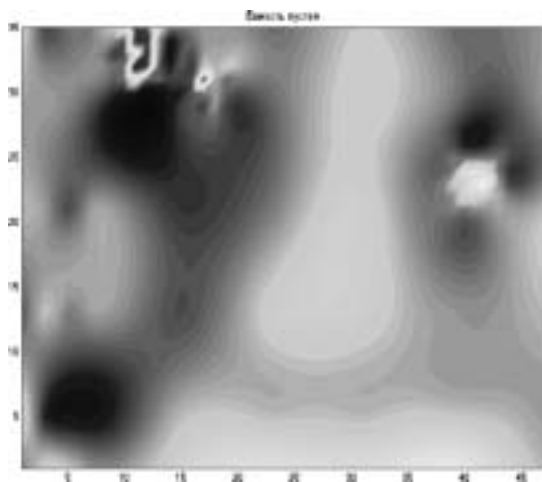


**Рис. 13. Топография распределения параметра поврежденности  $L$  на поверхности плоского напряженно-деформированного образца с концентратором напряжения (материал 17ГС; температура 20 °С; усилие 35 кН)**

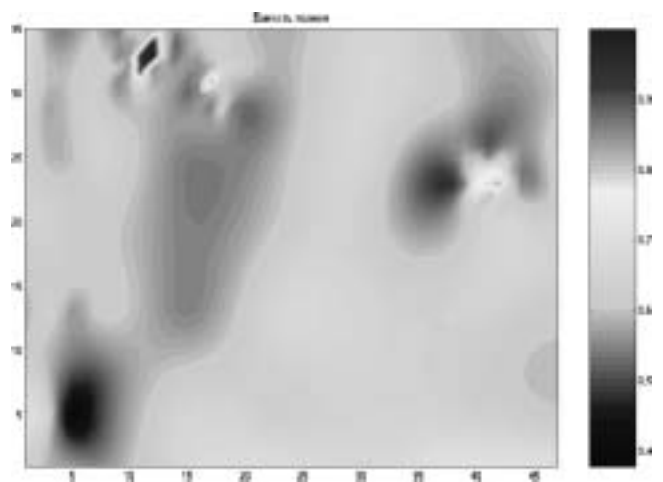


**Рис. 14. Топография распределения параметра поврежденности  $L$  на поверхности плоского напряженно-деформированного образца с концентратором напряжения (материал 17ГС; температура 200 °С; усилие 35 кН)**

На рисунках 15-16 представлены топография распределения параметра поврежденности  $L$  на поверхности пустой и заполненной емкости, имеющей локальные концентраторы напряжения в виде вмятин.



**Рис. 15. Картина распределения параметра поврежденности  $L$  по поверхности пустой емкости**



**Рис. 16. Картина распределения параметра поврежденности  $L$  по поверхности заполненной емкости**



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Сбор и анализ исходных материалов и создание базы данных о повреждениях, отказах, авариях и неполадках на нефтеперерабатывающих, нефтехимических предприятиях // Республики Башкортостан: Отчет о НИР ИППЭП / Руководитель Симонова Н.И. – Уфа, 1995.

2 Аронов А.Я., Попов А.Н., Морозова В.М., Ничипурук А.П. Экспериментальное исследование статистической взаимосвязи магнитных и механических параметров конструкционных сталей // Дефектоскопия. - 1988. № 3. - С. 25–31.

3 Аполлонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. – 224 с.

4 Гораздовский Т.Я. Неразрушающий контроль. - М.: Знание, 1977. 64 с.

5 Биргер И.А.. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

6 Баширов М.Г. Влияние упругой и пластической деформаций конструкционных сталей на параметры гармонических составляющих отраженного электромагнитного поля // Нефть и газ – 2001: проблемы добычи, транспорта и переработки: Межвузовский сб. научн. тр. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – С. 308-318.

7 Кузеев И.Р., Баширов М.Г. Электромагнитная диагностика оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. - 294 с.

8 А. С. 1397820 (СССР). МКИ G01 N 27/90. Вихретоковый преобразователь / В.В. Ключев, Ю.К. Федосенко, А.А. Абакумов, М.Г. Баширов // О.И. 1988. № 19.

9 А. С. 1765763 СССР. МКИ G01 N 27/90. Вихретоковое устройство для неразрушающего контроля / М.Г. Баширов // О. И. - 1992. - № 36.