

УДК 620.179.14:669.15

М.Г. Баширов

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

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОВ В НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ
СОСТОЯНИИ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА
ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ**

Оборудование предприятий нефтехимии и нефтепереработки в течение всего срока эксплуатации подвергается воздействию агрессивных сред и механических нагрузок, поэтому проблема диагностики технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса остается на сегодняшний день актуальной. Из теории напряженно-деформированного состояния твердого тела известно, что существует взаимосвязь между механическими и электрофизическими свойствами металлов. Но в задачах диагностики оборудования закономерности этих связей еще недостаточно изучены.

В отличие от механических, электрофизические параметры сравнительно легко поддаются измерению, поэтому могут быть использованы в качестве диагностических параметров.

Методы механики деформируемого твердого тела позволяют делать прогноз долговечности конструкций на основе расчета напряженно-деформированного состояния и температуры для любой точки конструкции в любой момент ее эксплуатации. В настоящее время для расчета напряженно-деформированного состояния металлических конструкций широко применяется метод конечных элементов. Метод конечных элементов является численным методом решения дифференциальных уравнений различного рода прикладных задач. Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Конечно-непрерывная функция определяется с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области [1, 2].

Рассмотрим плоское напряженное состояние конечного элемента на примере треугольной пластинки толщиной h , срединная плоскость которой совпадает с плоскостью $O'x$ у локальной правой системы координат $O'xuz$ [3]. Узлы расположены в вершинах элемента и имеют по две степени свободы.

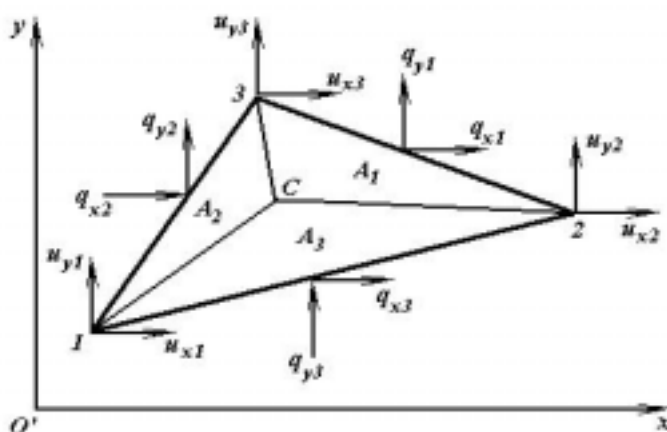


Рисунок 1 – Воздействие нагрузок на треугольный элемент

Для плоского напряженного состояния зависимости между деформациями и напряжениями записываются в виде:

$$\{\epsilon\} = [L_\partial] \{u\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \{u\}; \quad (1)$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} = \frac{E}{1 - \mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu}{2} \end{bmatrix} \{\epsilon\}. \quad (2)$$

При построении матрицы реакций для треугольного конечного элемента удобно использовать однородную систему координат [3]

$$L_1 = \frac{A_1}{A}; \quad L_2 = \frac{A_2}{A}; \quad L_3 = \frac{A_3}{A}; \quad (L_1 + L_2 + L_3 = 1), \quad (3)$$

где L_1, L_2, L_3 – однородные координаты произвольной точки C треугольника;

A_1, A_2, A_3 – составляющие площади треугольника.

Локальные координаты точек 1, 2, 3 и C заранее известны ($x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x, y$). Вычислив площади A_1, A_2, A_3 через эти координаты и подставив в (2.14), можно получить:

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \alpha_1 & y_{23} & x_{32} \\ \alpha_2 & y_{31} & x_{13} \\ \alpha_3 & y_{12} & x_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

где $\alpha_1 = x_2 y_3 - y_2 x_3$; $y_{23} = y_2 y_3$; $x_{23} = x_2 x_3$, остальные коэффициенты получаются круговой подстановкой индексов [2, 3].

Выражения для производных по x и y от функции однородных координат $f(L_1, L_2, L_3)$ имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{y_{23}}{2A} \frac{\partial f}{\partial L_1} + \frac{y_{31}}{2A} \frac{\partial f}{\partial L_2} + \frac{y_{12}}{2A} \frac{\partial f}{\partial L_3}; \\ \frac{\partial f}{\partial y} &= \frac{x_{32}}{2A} \frac{\partial f}{\partial L_1} + \frac{x_{13}}{2A} \frac{\partial f}{\partial L_2} + \frac{x_{21}}{2A} \frac{\partial f}{\partial L_3}. \end{aligned} \quad (5)$$

Функция $[F]$ представляет собой выражение [2]

$$[F] = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & L_2 & 0 & L_3 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 & L_2 & 0 & L_3 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Вектор узловых перемещений треугольника в локальной системе координат [3]:

$$\{U_\xi\} = [u_{x1} \quad u_{y1} \quad u_{x2} \quad u_{y2} \quad u_{x3} \quad u_{y3}]^T. \quad (7)$$

Матрица реакций для треугольного элемента

$$[R_\xi] = Ah[B]^T [D][B], \quad (8)$$

где

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Вектор реакций $\{Q_\xi\}$ включает в себя три составляющие, обусловленные действием объемных $\{Q_{\xi p}\}$ и поверхностных нагрузок $\{Q_{\xi q}\}$, а также перепадом температур $\{Q_{\xi t}\}$ соответственно:

$$\{Q_\xi\} = \{Q_{\xi p}\} + \{Q_{\xi q}\} + \{Q_{\xi t}\}, \quad (10)$$

Решение разрешающей системы уравнений методом перемещений дает возможность вычислить вектор узловых перемещений $\{U_\xi\}$ для любого элемента. Тогда выражения (1), (2) примут вид [3]

$$\{\epsilon\} = [B]\{U_\xi\}, \quad \{\sigma\} = [D][B]\{U_\xi\}, \quad (11)$$

то есть деформации и напряжения постоянны в любой точке треугольника.

Решение задачи расчета напряженно-деформированного состояния может быть проведено одним из двух методов. С помощью первого метода решают дифференциальные уравнения с заданными граничными условиями. Второй метод заключается в минимизации интегральной величины, связанной с работой напряжений и внешней приложенной нагрузки. Если задача решается в перемещениях и на границе заданы их значения, то нужно минимизировать потенциальную энергию системы. А если задача решается в напряжениях с заданными на границе усилиями, то нужно минимизировать дополнительную работу системы. Формулировка метода конечных элементов предполагает определение поля перемещений и тем самым связана с минимизацией потенциальной энергии системы при определении узловых значений вектора перемещений. После того как точки перемещений будут определены, можно вычислить компоненты тензоров деформаций и напряжений [4].

Для нахождения перемещений в узловых точках необходимо записать матрицу жесткости, коэффициенты которой зависят от упругих меха-

нических свойств нагруженного материала, а так же определить вектор-столбец, описывающий все усилия, приложенные к моделируемой системе. Решение системы уравнений дает значения вектора-столбца – перемещений узловых точек. Исходя из закона Гука, по значениям перемещений можно определить механические напряжения в тех же узловых точках [4].

Для расчета напряженно-деформированного состояния исследуемых образцов, а затем для расчета топографии изменения электрофизических свойств методом конечных элементов, в данной работе использован комплекс ELCUT. ELCUT – это мощный современный комплекс программ для инженерного моделирования механических, тепловых и электромагнитных задач методом конечных элементов, являющийся полноценным Windows 95/98/NT приложением. Интерактивный постпроцессор позволяет просмотреть результаты расчета в различных формах представления: линии поля, цветные карты, графики различных величин вдоль произвольных контуров и др. Позволяет вычислять различные интегральные величины на заданных линиях, поверхностях или объемах.

Для примера рассмотрим расчет напряжений и деформаций, возникающих в металлических образцах при действии механических нагрузок. Результаты вычислений представлены в виде топографии распределения механических напряжений. Аналогично может быть выведена картина распределения одной из ниже перечисленных величин:

- а) перемещения δ_x , δ_y и δ ;
- б) деформации ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy} и главные деформации ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 ;
- в) напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} и главные напряжения σ_1 , σ_2 , σ_3 ;
- г) критерии прочности по Треску σ_{Tr} , по Мизесу σ_{Mi} , по Мору σ_{Mo} и по Прагеру σ_{Pr} ;
- д) относительное напряжение в виде индекса Хилла K_{Hi} ;
- е) превышение температуры тела ΔT в случае перегрузки.

На рисунке 2 представлена расчетная картина распределения механического напряжения в условиях напряженно-деформированного состояния образца из стали марки 40Х при внецентровом нагружении. Как видно из рисунка самым опасным местом является зона выточки, так как здесь возникает максимальное механическое напряжение.

На рисунке 3 изображено распределение механических напряжений для образца из стали марки 20 при центрально-осевом нагружении.

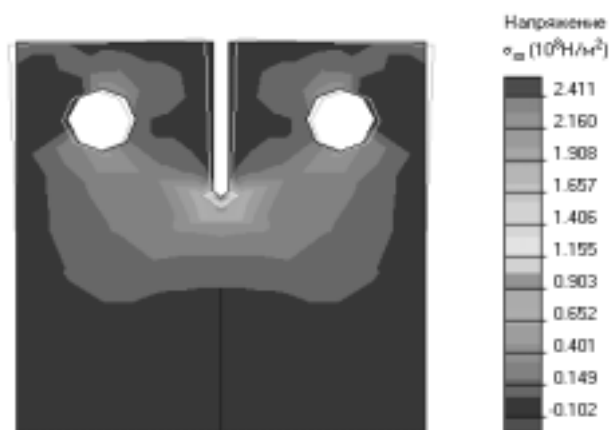


Рисунок 2 – Картина распределения напряжений в образце из стали марки 40X

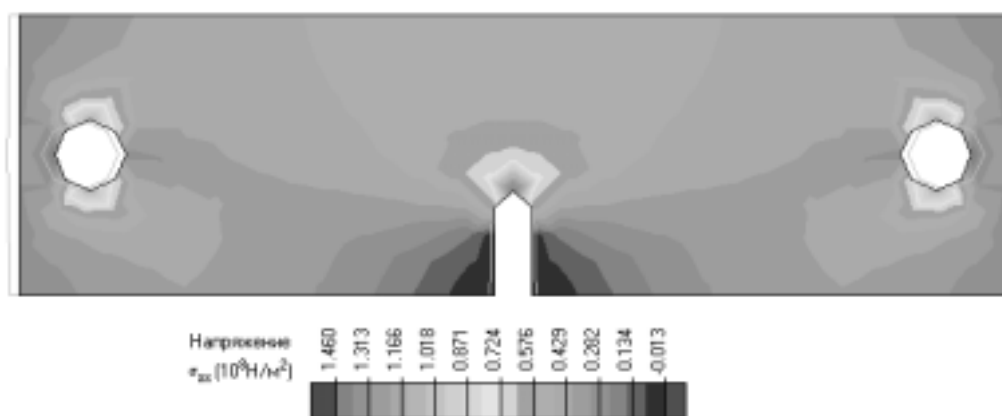


Рисунок 3 – Распределение напряжений в образце из стали марки 20

Для расчета напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов оборудования 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 дает необходимую точность. Для решения этой проблемы 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 любого элемента конструкции [5].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают существование закономерностей влияния структурных параметров металлов на их электрофизические и механические свойства. Корреляционный и регрессионный анализы парных зависимостей между магнитными характеристиками и механическими свойствами, проведенные в работе [5], показывают, что в изучаемом интервале изменения механических Y и магнитных X свойств наиболее подходящей оказывается линейная зависимость

$$Y=a+bX. \quad (12)$$

По полученным статистическим зависимостям производится оценка механических свойств по измеренным значениям электрофизических параметров. Например, если использовать в качестве диагностического параметра коэрцитивную силу H_c , то после подстановки выражений связи $\sigma_T \sim H_c$, $\sigma_B \sim H_c$, $\sigma_p \sim H_c$ в функцию, описывающую диаграмму растяжения, получается соотношение [5]:

$$\sigma = \sigma_T(H_c) + (\sigma_1(H_c) - \sigma_T(H_c))(\varepsilon/\delta_p(H_c))^{1/2} - (\sigma_2(H_c) - \sigma_T(H_c))(\varepsilon/\delta_p(H_c))^2. \quad (13)$$

Данное соотношение устанавливает связь между напряжением и пластической деформацией для любого значения коэрцитивной силы в рассматриваемом интервале изменения физико-механических свойств. Таким образом, для получения диаграммы нагружения исследуемого металла необходимо измерить значение коэрцитивной силы и подставить в это соотношение.

Для получения статистической зависимости между электрофизическими и механическими свойствами наиболее широко применяемых в нефтехимическом машиностроении сталей: 20, 40Х, 16ГС, 09Г2С, 12Х18Н10Т были проведены механические испытания на растяжение, сжатие, кручение, циклическую и динамическую нагрузку на испытательных машинах УММ-5, УММ-50, КМ-50-1, МК-30А и установке, разработанной на кафедре ОПНН Салаватского филиала УГНТУ. Измерение электрофизических параметров осуществлялось с помощью разработанных электромагнитных преобразователей с последующей обработкой информации на персональном компьютере по специально разработанным программам. В про-

цессе испытаний непосредственно измерялись или вычислялись значения удельной электрической проводимости γ , начальной и максимальной относительной магнитной проницаемости μ , коэрцитивной силы H_c .

На рисунке 4 представлена экспериментально снятая зависимость относительной начальной магнитной проницаемости от растягивающего усилия, приложенного к цилиндрическому образцу с концентратором напряжения из стали марки 3.

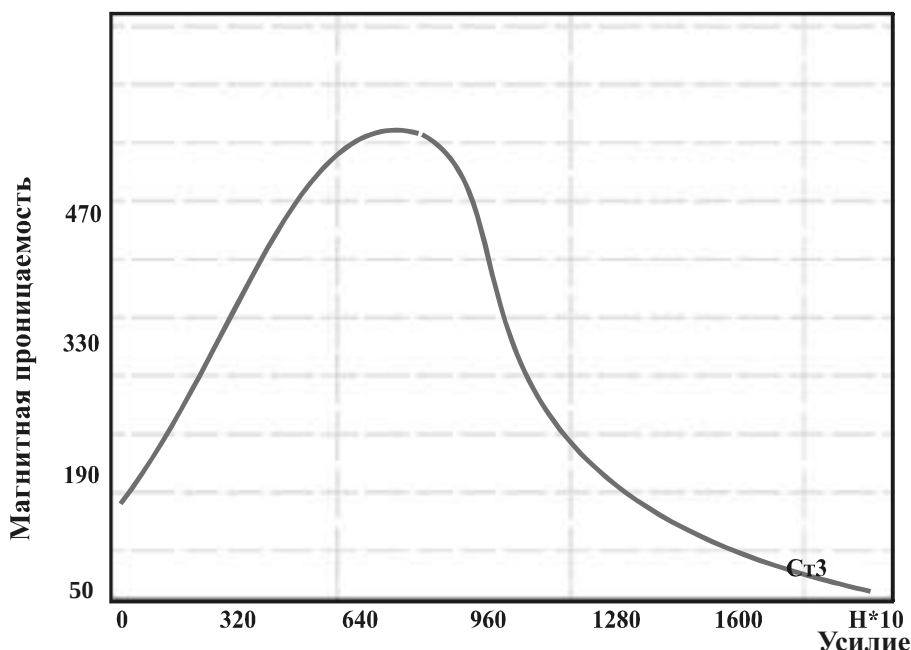


Рисунок 4 - Зависимость магнитной проницаемости от растягивающего усилия

На рисунке 5 изображена зависимость удельной электрической проводимости цилиндрического образца с концентратором напряжения из стали 12Х18Н10Т от величины растягивающего усилия. Для устранения влияния механических напряжений и изменения электрофизических свойств, возникших в процессе изготовления, образцы подвергались рекристаллизационному отжигу и размагничивались гармоническим, плавно убывающим до нуля внешним магнитным полем.

В пределах любого конечного элемента конструкции искомый расчетный электрофизический параметр может быть выражен через полином степени n координат x , y и z [6]:

$$u(x, y, z) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z + \alpha_4 xy + \dots + \alpha_p z^n, \quad (14)$$

причем для любого из элементов коэффициенты $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ полинома принимают отличные от полиномов других элементов значения. Кроме того, эти коэффициенты можно связать с потенциалами узлов $u_0, u_1, u_2, \dots, u_p$ таким образом, чтобы обеспечить условие минимума энергии поля, что достаточно для соответствия искомого распределения потенциала уравнениям Максвелла.

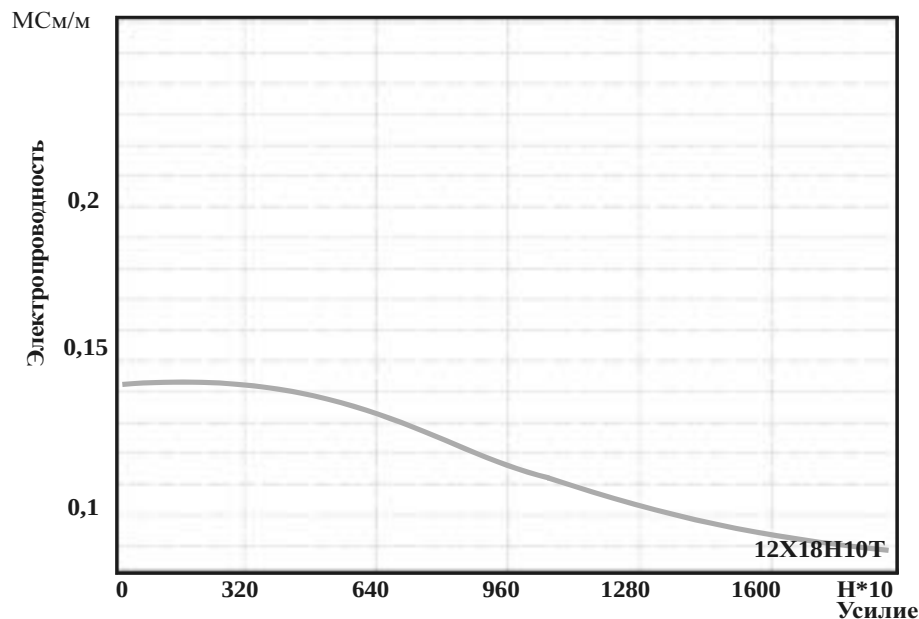


Рисунок 5 - Зависимость удельной электрической проводимости материала образца от величины растягивающего усилия

Пусть потенциал $u(x, y, z)$ в произвольной точке внутри конечного элемента связан с потенциалами $u_0, u_1, u_2, \dots, u_p$ через некоторую совокупность функций φ_i [6]:

$$u(x, y, z) = u_0 \varphi_0 + u_1 \varphi_1 + \dots + u_p \varphi_p = \sum_{i=0}^p u_i \varphi_i. \quad (15)$$

Если в выражении (13) вместо произвольных координат принять координаты узлов конечного элемента, то можно получить следующую систему уравнений:

Как видно из рисунка 4, максимальное значение величины коэрцитивной силы приходится на тот край детали, где имеется выточка и в данном примере составляет $H_c=532,56$ А/м. Полученное значение величины коэрцитивной силы соответствует максимуму величины перемещения ε .

Аналогично было рассчитано распределение максимальной относительной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$, топография которой представлена на рисунке 5.

Определение значений электрофизических параметров металлов, соответствующих предельным значениям механических напряжений, позволяет путем измерения численных значений этих параметров выявлять зоны повышенной концентрации напряжений, прогнозировать остаточный ресурс эксплуатации оборудования.

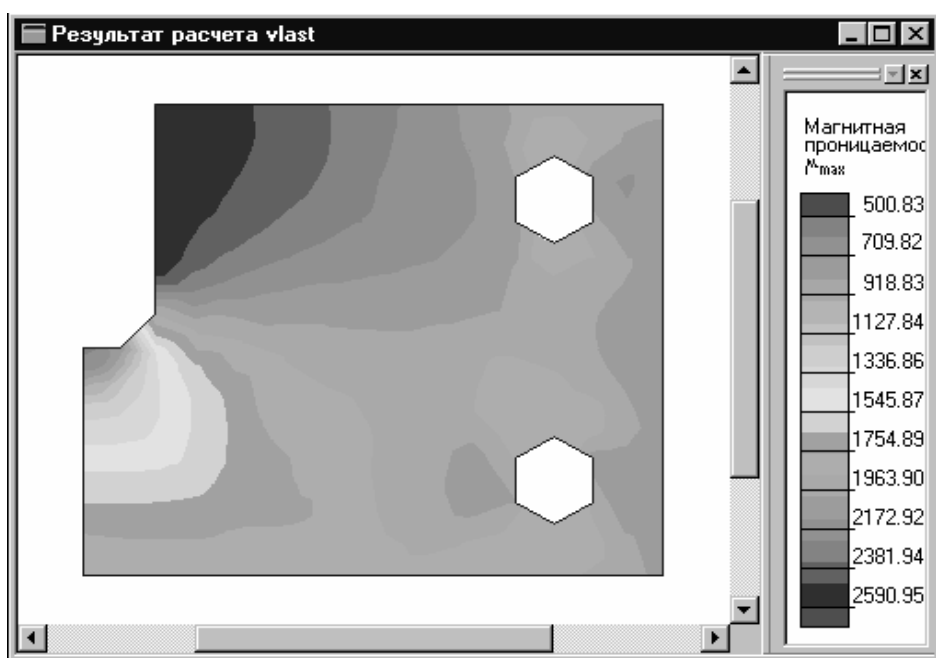


Рисунок 7 – Распределение величины $\mu_{\max}$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ.— М.:Мир. – 1976. – 392 с., ил.
- 2 Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. – М.: Мир – 1986. – 318 с., ил.
- 3 Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник. Под общ. ред. В.И. Мяченкова.—М.: Машиностроение – 1989. – 520 с., ил.

- 4 Федосьев В.И. Сопротивление материалов.—8-е изд., стереотип.—М.: Наука. Главная ред. физико-математической литературы.—1979.— 560 с., ил.
- 5 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.
- 6 Неразрушающий контроль металлов и изделий: Справочник. Под ред. Г.С.Самойловича. — М.: Машиностроение — 1976 — 456 с., ил.