

3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – Киев : Госстандарт Украины, 1999.
4. Жаркин А.Ф. Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов / А.Ф. Жаркин, В.А. Новский, С.А. Палачев. – Киев : Институт электродинамики НАН Украины, 2010. – 167 с.
5. Гудим В.І. Технічні засоби зниження гармонік в електропостачальних системах / В.І. Гудим // Технічна електродинаміка. – 1996. – №3. – С. 30-35.

**Bibliography:**

1. Increase of the efficiency use of energy in the systems of electrotechnology / A.K. Shydlovsky [et al.]. – Kiyev : Naukova vumka, 1990. – 240 p. (Rus.)
2. Zhezhelenko I.V. Quality of electric energy in industrial plants / I.V. Zhezhelenko, Yu.L. Saenko. – M. : Energoatomizdat, 2005. – 261 p. (Rus.)
3. GOST 13109-97. Electrical energy. Requirements to the quality of electrical energy in electric networks of general purpose. – Kiev : State Standard of Ukraine, 1999. (Rus.)
4. Zharkin A.F. Normative and legal regulation of the quality of electric energy. The analysis of Ukrainian and European legislative acts and normative and technical documents / A.F. Zharkin, V.A. Novskiy, S.A. Palachev. – Kiev : Institute of electrodynamics NAS of Ukraine, 2010. – 167 p. (Rus.)
5. Gudym V.I. Technical facilities reduction of harmonics in the electricity supply systems / V.I. Gudym // Technical electrodynamics. – 1996. – №3. – P. 30-35. (Ukr.)

Рецензент: О.І. Скрипник  
д-р техн. наук, директор ТзОВ «Елекс»

Стаття надійшла 06.05.2015

УДК 621.7:62-192:669.02/09

© Гулаков С.В.<sup>1</sup>, Щербаков С.В.<sup>2</sup>

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ANSYS ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ НАГРЕВА**

*Рассмотрены вопросы применения современных средств анализа напряженно-деформированного состояния цилиндрических конструкций при воздействии локальным источником нагрева. С применением системы конечно-элементных расчетов ANSYS разработана методика, позволяющая с большой эффективностью выполнять моделирование напряженно-деформированного состояния деталей конструкций и прогнозировать распределение деформаций с целью обеспечения необходимых условий дальнейшей сборки и эксплуатации. Применение современных методов численного и графического анализа дало возможность получить прогнозируемые результаты для реализации широкого спектра технологических вариантов изготовления различных конструкций с максимальной эффективностью, оптимальными энергетическими и временными затратами.*

**Ключевые слова:** составные изделия, локальный источник нагрева, сварочные напряжения и деформации, математическое моделирование, конечно-элементный анализ.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [gulakov\\_s\\_v@pstu.edu](mailto:gulakov_s_v@pstu.edu)

<sup>2</sup> ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [sherbakov\\_s\\_v@pstu.edu](mailto:sherbakov_s_v@pstu.edu)

*Гулаков С.В., Щербаков С.В. Застосування програмної системи кінцево-елементного аналізу ANSYS для комп'ютерного моделювання напруженого стану циліндричних виробів при дії локального джерела нагріву. Розглянуто питання застосування сучасних засобів аналізу напружено-деформованого стану циліндричних конструкцій при дії локальним джерелом нагрівання. Із застосуванням системи кінцево-елементних розрахунків ANSYS розроблена методика, що дозволяє з великою ефективністю виконувати моделювання напружено-деформованого стану деталей конструкцій і прогнозувати розподіл деформацій з метою забезпечення необхідних умов подальшої збірки і експлуатації. Застосування сучасних методів чисельного та графічного аналізу дало можливість отримати прогнозовані результати для реалізації широкого спектру технологічних варіантів виготовлення різних конструкцій з максимальною ефективністю, оптимальними енергетичними та часовими витратами.*

**Ключові слова:** складові вироби, локальний джерело нагріву, зварювальні напруження і деформації, математичне моделювання, кінцево-елементний аналіз.

*S.V. Gulakov, S.V. Shcherbakov. Application of a software system of finite-element analysis ANSYS for computer modelling of cylindrical products stress state at exposure to local heat sources. Developing manufacturing techniques of compound items it is necessary to consider the factors influencing the distribution of welding stresses resulting from local heating source in the considered conjugation interface under consideration and the nature of the changes in it. Using real products in research results in high financial and energy costs as well as possible crashes. Distribution of heat when exposed to a local heating source as well as structural, phase, chemical transformations and other technological factors can be thoroughly studied at simulating materials and processes models. The purpose of this modeling is to develop methodology for calculating the stress-strain state of compound parts structure under the influence of a local heating source using numerical finite element method (FEM). This is accomplished using numerical simulation algorithms, that is the finite element method as the most powerful and functional means of numerical analysis in a wide variety of engineering problems. Classic FEM algorithm is implemented in several steps: sampling the area under consideration, the choice of the variational principle for determining the basic unknown functions, the choice of approximating functions, the implementation of the variational principle, the introduction of boundary conditions, solution of algebraic equations using standard numerical methods. After determining the nodal displacements in accordance with the known theory of elasticity ratios the strain and stress state is calculated. Using finite-element calculations ANSYS system a method that makes it possible to perform with great efficiency modeling the stress-strain state of structural components and to predict the distribution of strains in order to ensure conditions of regulated assembling of compound products.*

**Keywords:** compound products, local source of heating, welding stress and deformation, mathematical modeling, finite element analysis.

**Постановка проблеми.** В настоящее время большое распространение в промышленности нашли составные изделия, состоящие из оси и бандажа. Фиксация бандажа на оси в основном осуществляется за счет натяга [1]. Данная технология, особенно при изготовлении крупных изделий, сопряжена со значительными энергетическими затратами и требованиями к точности выполнения размеров сопрягаемых поверхностей. Неравномерный нагрев или охлаждение, выход за пределы допуска при подготовке этих изделий для сборки могут привести либо к сползанию бандажа с оси либо к его разрушению.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Авторами предложен метод фиксации бандажа на оси за счет его локального нагрева по окружности [2].

Аналитический расчет деформации деталей конструкции сопряжен с рядом трудностей, связанных с большим объемом вычислений, недостаточно высокой точностью расчетов и рядом других факторов. Получить реальную картину распределения напряженно-

деформированного состояния в зоне контакта можно с использованием методов конечно-элементного анализа. Первые работы по проведению такого анализа осуществлены в [3, 4].

**Целью статьи** является более глубокое исследование в этой области, в частности, применение программной системы конечно-элементного анализа ANSYS для прогнозирования напряженно-деформированного состояния деталей конструкций.

**Изложение основного материала.** ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного анализа в сфере автоматизированных инженерных расчётов. С её помощью в единой среде на одной и той же конечно-элементной модели возможно моделирование задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Реализовано решение линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач, в частности, нестационарных геометрически и физически нелинейных задач контактного взаимодействия элементов конструкций. Существенным достоинством системы является наличие интерактивного режима работы. Это значительно упрощает процедуры создания конечно-элементной модели и оценку результатов (пре- и пост-процессорная обработка). Есть возможность использования интерактивной графики для проверки геометрии модели, заданных свойств материалов и граничных условий перед началом счета и для контроля результатов решения [5, 6].

Моделирование выполнялось в несколько этапов: разработка геометрической модели детали, выбор типа узлов, построение конечно-элементной схемы и подготовка исходных данных; выполнение расчета; обработка результатов расчета. В качестве объекта моделирования выбран составной прокатный валок с бочкой в виде полого цилиндра (рис. 1).

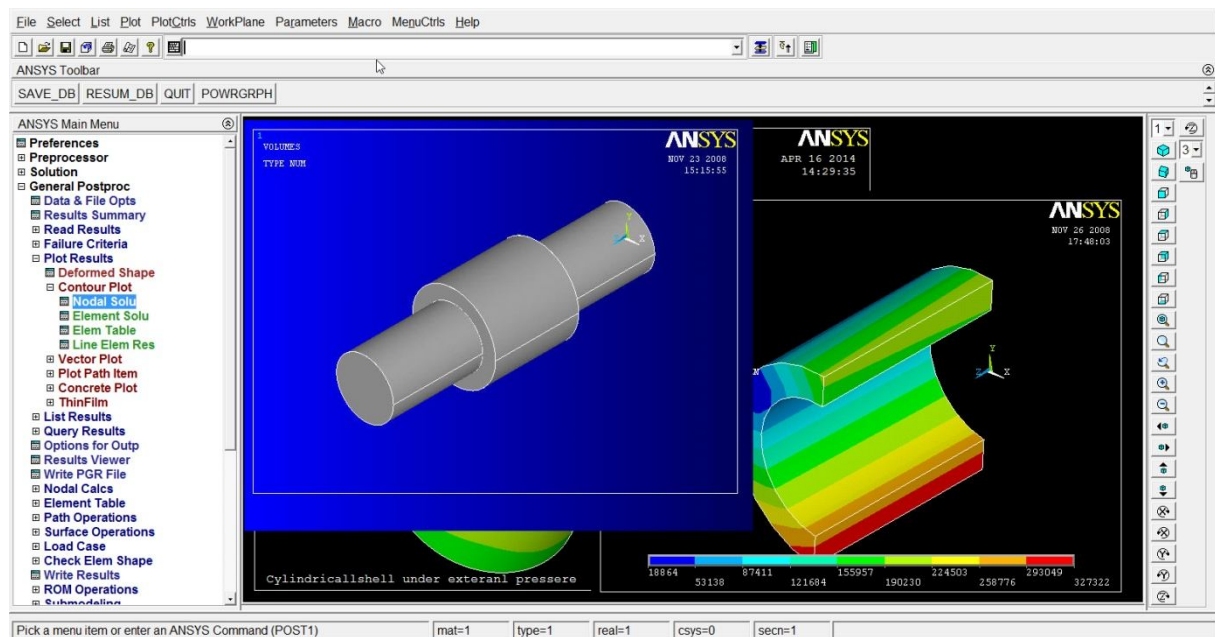


Рис. 1 – Интерфейс программной системы Ansys

На первом этапе создана конечно-элементная расчетная модель (рис. 2) с учетом физических свойств материала (высокоуглеродистая валковая сталь) и конструктивных особенностей: тип анализа – структурный, материал модели – изотропный, с усредненными характеристиками для стали (коэффициент Пуассона  $\mu = 2 \cdot 10^{-11}$ , модуль упругости  $E = 0,26$ ).

Численная реализация задачи термо-упругой деформации в среде ANSYS при воздействии на поверхность локальным источником нагрева выполнена в две стадии – моделирование нагрева с последующим расчетом остаточных напряжений. Тип анализа – термический, структурный; свойства материала модели: плотность  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоёмкость  $C = 460 \text{ Дж/(кг·К)}$ .

В основу термического расчета положено дифференциальное уравнение теплопроводности с учетом зависимости от температуры в цилиндрической системе координат [7]. Результаты

моделирования распределения температурного поля и деформации приведены на рис. 3. Изменяя технологические параметры изготовления изделия, можно получить различный характер распределения напряжений, регламентируя тем самым различные эксплуатационные характеристики изделия.

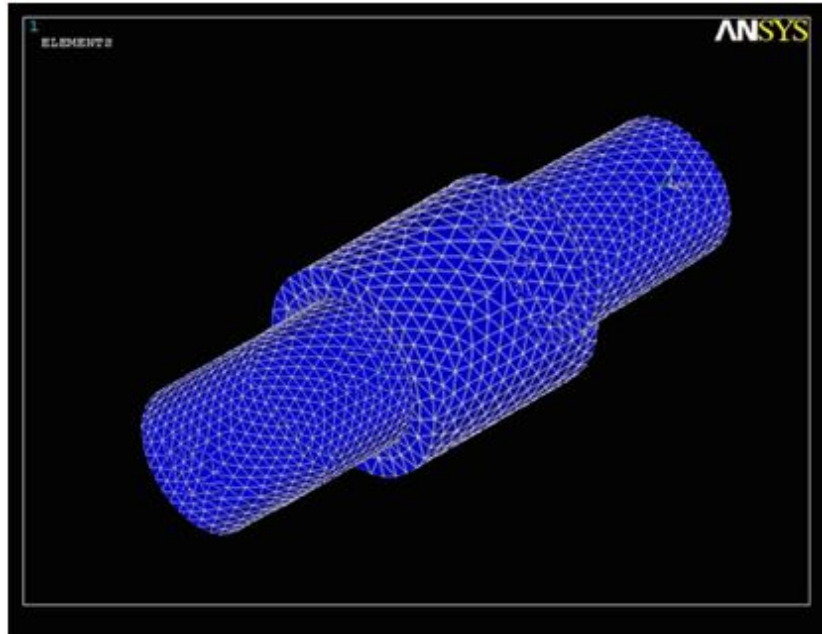


Рис. 2 – Конечно-разностная модель элементов составной конструкции

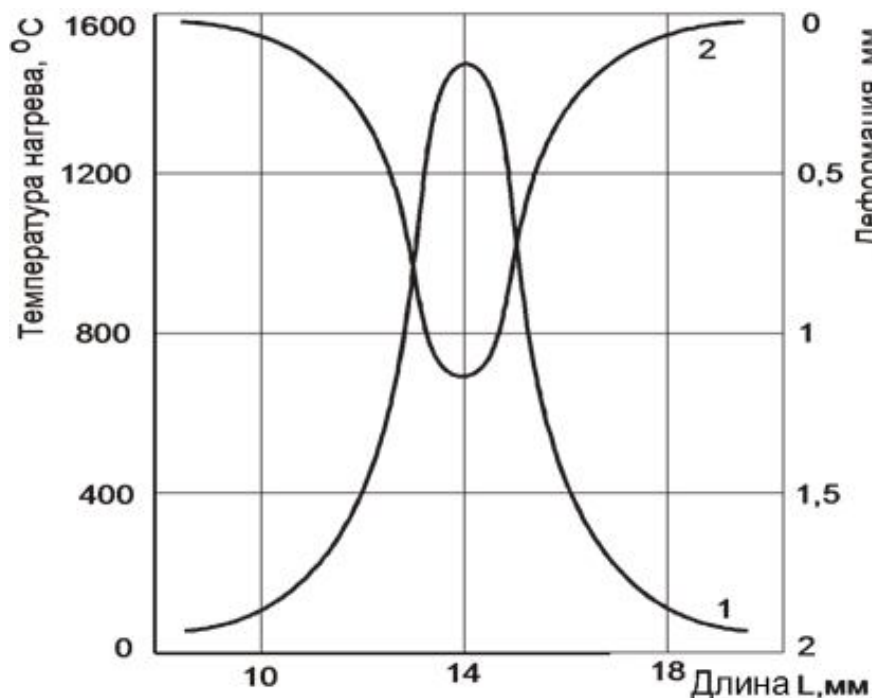


Рис. 3 – График распределения температур и деформаций

С этой целью на основании данных о распределении температурного поля  $T(x, y, z)$ , заданных свойств материала модели (коэффициент линейного расширения  $\alpha_T$ , модуль нормальной упругости  $E(T)$ ) рассчитаны относительные температурные деформации  $\varepsilon_T(x, y, z)$  и соответствующие им напряжения  $\sigma(x, y, z)$ . Результаты приведены на рис. 4.

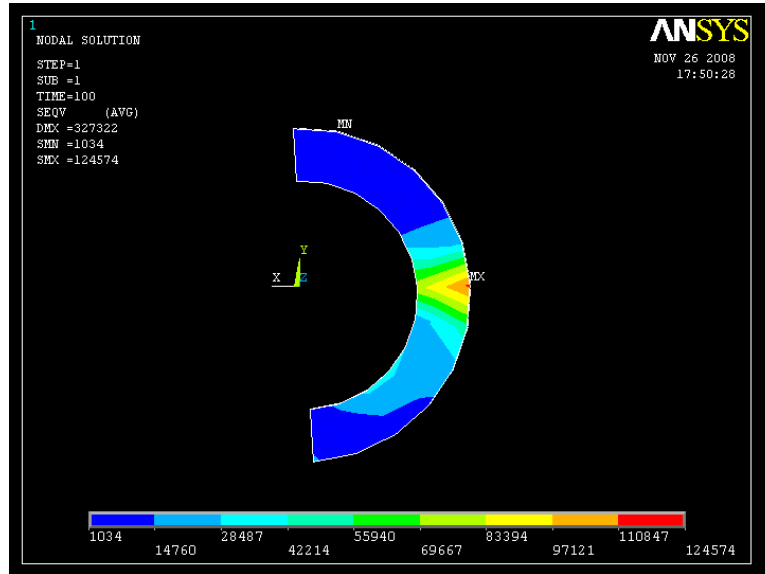


Рис. 4 – Градиент распределения деформаций

Как видно из результатов моделирования (рис. 3, 4), при воздействии концентрированным источником нагрева на поверхность оболочечной конструкции в зоне воздействия возникают остаточные напряжения сжатия, обеспечивающие получение неразъемных соединений в различных технологических вариантах изготовления составных изделий.

В результате моделирования построены статические и анимационные модели, выполненные по методике [2] с наглядным отображением технологии и вариантов сборки.

С помощью интерактивной графики системы ANSYS продемонстрированы свойства материалов объектов, а также проявление эффектов внешней среды.

С применением системы конечно-элементных расчетов ANSYS разработана методика, позволяющая с большой эффективностью выполнять моделирование напряженно-деформированного состояния деталей конструкций и прогнозировать распределение деформаций с целью обеспечения регламентированных условий сборки.

### Выводы

Применение современных методов численного и графического анализа позволяет наметить ряд перспективных путей: упрощение технологии и снижение трудоемкости изготовления деталей и узлов механизмов. Дальнейшие исследования в области численного моделирования задачи термо-упругой деформации при воздействии локального нагрева позволят получать прогнозируемые результаты для реализации широкого спектра технологических вариантов изготовления различных конструкций с максимальной эффективностью, оптимальными энергетическими и временными затратами.

### Список использованных источников:

1. Полухин В.П. Составной рабочий инструмент прокатных станков / В.П. Полухин, П.И. Полухин, В.А. Николаев. – М. : Металлургия, 1977. – 88 с.
2. Гулаков С.В. Соединение элементов бандажированных изделий применением локального нагрева / С.В. Гулаков, С.В. Щербаков, Н.Г. Заварика // Захист металургійних машин від поломок : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2000. – Вип. 5. – С. 234-237.
3. Гулаков С.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния деталей составных конструкций с применением метода конечных элементов / С.В. Гулаков, С.В. Щербаков // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2009. – Вип. 19. – С. 174-176.
4. Гулаков С.В. Повышение надежности фиксации бандаж на оси локальной термической обработкой (воздействием) / С.В. Гулаков, С.В. Щербаков // Захист металургійних машин від поломок : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2008. – Вип. 10. – С. 117-119.

5. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
6. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров : справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.
7. Березовский Б.М. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирования шва / Б.М. Березовский. – Челябинск : ЮУрГУ, 2002. – 585 с. – (Математические модели дуговой сварки : в 3-х т.; Т. 1).

**Bibliography:**

1. Poluhin V.P. Composite working tool mills / V.P. Poluhin, P.I. Poluhin, V.A. Nikolayev. – Moscow : Metallurgiya, 1977. – 88 p. (Rus.)
2. Gulakov S.V. Connection elements banded products using local heating / S.V. Gulakov, S.V. Shcherbakov, N.G Zavarika // Zakhist metalurgiy-nikh mashin vid polomok : Collection of scientific works / PSTU. – Mariupol, 2000. – Issue 5. – P. 234-237. (Rus.)
3. Gulakov S.V. Numerical modeling of stress-strain state of parts of composite structures using finite element method. / S.V. Gulakov, S.V. Shcherbakov // Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / PSTU. – Mariupol, 2009. – Issue 19. – P. 174-176. (Rus.)
4. Gulakov S.V. Improving the reliability of fixation bandage on the axis of the local heat treatment (exposure) / S.V. Gulakov, S.V. Shcherbakov // Zakhist metalurgiy-nikh mashin vid polomok : Collection of scientific works / PSTU. – Mariupol, 2008. – Issue 10. – P. 117-119. (Rus.)
5. Basov K.A. ANSYS examples and problems / K.A. Basov. – Moscow : ComputerPress, 2002. – 224 p. (Rus.)
6. Chigarev A.V. ANSYS to engineers: reference book / A.V. Chigarev, A.S. Kravchuk, A.F. Smalyuk. – Moscow : Mashinostroenie, 2004. – 512 p. (Rus.)
7. Berezovsky B.M. Mathematical modeling and information technologies, the model of the weld pool and weld formation / B.M. Berezovsky. – Chelyabinsk : YUrGU, 2002. – 585 p. – (Mathematical models of arc welding : in 3 vol.; Vol. 1). (Rus.)

Рецензент: В.И. Щегина  
д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 15.05.2015