



Modeling and Investigation of Influence of the Formation Regimes of Wear-resistant Nano-filled Metal-polymer Composites on a Stress State of Areas Contact Interaction of Structural Components

Vadim KOVTUN¹, Mitko MIHOVSKI², Vladimir PASOVETS³,
Yury PLESKACHEVSKY⁴, Yordan MIRCHEV²

¹ Gomel Branch University of Civil Protection
of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus; Gomel, Belarus
Phone: +375 232 461313, Fax: +375 232 460000; e-mail: vadimkov@ya.ru

² Institute of Mechanics of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria;
e-mail: office@imbm.bas.bg

³ University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus;
Minsk, Belarus; e-mail: pasovets_v@mail.ru

⁴ National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: pleskachevsky@bntu.by

Abstract

The authors performed computer simulation of the interaction of nano- and micro-dispersed components of the powder metal-polymer systems in the process of obtaining composite materials by the method of electrocontact sintering. For this purpose, the geometry of the mesofragment of the metal-polymer systems was developed, material properties, boundary conditions were determined, and a finite-element model was created, equivalent stresses were calculated.

Keywords: consolidation of components, carbon nanotubes, metal polymer powder systems, metal matrix, microdispersed polymer, stress state, electrocontact sintering, wear-resistant material.

Моделирование и исследование влияния режимов формирования износостойких нанонаполненных металлополимерных композитов на напряженное состояние областей контактного взаимодействия структурных составляющих

Вадим КОВТУН, Митко МИХОВСКИ, Владимир ПАСОВЕЦ,
Юрий ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ, Йордан МИРЧЕВ

1. Введение

Разработка и внедрение в производство новых композиционных материалов является одним из наиболее эффективных путей совершенствования современных конструкций машин и механизмов. В процессе разработки описание таких материалов связано с большой математической трудоемкостью, поскольку их компоненты, обладая существенным различием свойств, осуществляют взаимодействие. При этом изменения технологических режимов производства таких композитов может значительно влиять на свойства конечного продукта, что не наблюдается при производстве традиционных материалов, например, железоуглеродистых сплавов, технология производства которых хорошо отработана и устойчива к колебаниям параметров технологического процесса в определенных пределах.

Следует отметить, что в настоящее время разработка и получение конкурентоспособных изделий, в том числе из композитов, не возможно без применения

компьютерных технологий. Учитывая сложность современных задач, моделирование композитных материалов необходимо проводить с использованием современных систем инженерного анализа, реализующих метод конечных элементов [1].

На основании анализа литературных источников осуществлен подбор программного продукта, позволяющего выполнять решения сложных 3-D задач по расчету термонапряженного состояния композиционных материалов, содержащих в своем составе микро- и наноразмерные компоненты. Показано, что система ANSYS, реализующая метод конечных элементов, дает возможность с высокой точностью рассчитать поля напряжений и тепловые потоки в композиционном материале в процессе технологического воздействия давлением и электрическим током. При этом численное моделирование позволяет определить и оптимизировать физико-механические характеристики материала и выявить уже на стадии проектирования его слабые места.

Необходимо обратить внимание на то, что технология литейных металлов и сплавов на их основе сопряжена с большими потерями материала, трудностью ввода в их состав дисперсных микро- или нанодобавок и их последующего распределения в структуре материала. В этой связи перспективной технологией получения композиционных материалов с заранее заданными эксплуатационными свойствами является порошковая металлургия. При этом ввод в металлическую матрицу наноразмерных компонентов позволяет создавать материалы с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами для применения в ряде отраслей промышленности. В ряде работ показано, что углеродный наноструктурный наполнитель, добавленный в металлическую матрицу, позволяет повысить прочность материала и снизить коэффициент трения.

Однако на сегодняшний день не достаточно изученным остаётся вопрос о влиянии режимов формирования износостойких нанонаполненных металлополимерных композитов на термонапряженное состояние областей контактного взаимодействия структурных составляющих.

Таким образом, изучение напряженного состояния порошковых композиционных материалов методами компьютерного моделирования даст возможность прогнозировать эффективные пути повышения прочностных и триботехнических характеристик данного вида материалов.

Цель представленной работы состояла в исследовании методами компьютерного моделирования напряженного состояния порошковых нанонаполненных металлополимерных композиционных материалов в процессе электросилового воздействия на исходные компоненты.

2. Расчетные схемы и конечно-элементные модели

Основными этапами расчета в программном комплексе ANSYS являются: построение геометрии исследуемого объекта; ввод свойств материалов; формирование граничных условий; генерация сетки конечных элементов; проведение расчета; визуализация и анализ результатов.

Разработаны расчетные схемы и конечно-элементные модели для исследования напряженно-деформированного и теплового состояний, а также изучения механизма развития процессов консолидации компонентов металлополимерных порошковых систем.

Расчетные схемы мезофрагментов областей контактного взаимодействия структурных составляющих нанонаполненных металлополимерных дисперсных систем, построенные на основании микроструктурных исследований, включают в себя фрагменты частиц меди, полимерного наполнителя в виде политетрафторэтилена

(ПТФЭ) и углеродную нанотрубку (УНТ) (рисунки 1 и 2). Так на рисунке 2, а представлено поперечное сечение мезофрагмента области контактного взаимодействия компонентов нанонаполненных материалов, а на рисунке 2, б – продольное сечение мезофрагмента.

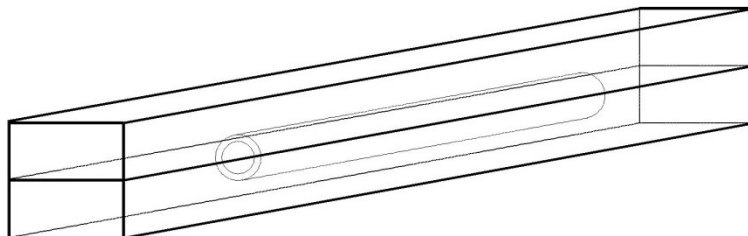


Рисунок 1 – Пространственное расположение компонентов мезофрагмента металлополимерной нанонаполненной порошковой системы

На основании расчетной схемы построены конечно-элементные модели (рисунок 3) мезофрагментов областей контактного взаимодействия структурных составляющих нанонаполненных металлополимерных дисперсных систем. При этом были исследованы следующие модели взаимного расположения компонентов в области их контактного взаимодействия, которые включают:

- 1) фрагменты двух частиц меди и одну УНТ;
- 2) фрагмент частицы меди, фрагмент частицы полимерного наполнителя и одну УНТ;
- 3) фрагменты двух частиц меди и одну УНТ.

Деформирование частиц порошкового металлополимерного нанонаполненного материала происходит в соответствии с упруго-пластичной моделью: частиц меди (модуль Юнга $E_m = 110$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_m = 0,37$), УНТ ($E_{унт} = 2000$ ГПа, $\nu_{унт} = 0,18$), ПТФЭ ($E_p = 0,49$ ГПа, $\nu_p = 0,45$). Ввод свойств материалов проводился с помощью вкладки Material models меню Preprocessor.

Следует отметить, что одним из основных этапов в процессе получения решения является правильное формирование граничных условий. От значений граничных условий зависит размерность расчетной области (число расчетных точек и конечных элементов). Граничными условиями являются значения электрического тока и нагрузки. С учетом того допущения, что частицы меди и прикладываемое усилие прессования распределены равномерно, то на каждый выделенный мезофрагмент материала действует сжимающая сила, равная $1,2 \cdot 10^{-6}$ Н. Сжимающая сила определена из условия, что усилие сжатия электродов опытно-промышленной установки в процессе электроконтактного спекания исследуемых композитов составляла 12 000 Н, а площадь зоны спекания составляла порядка 15 мм². Разработанные компьютерные модели имеют ограниченную возможность перемещения нижних границ. Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) проводилась на основе решения объемной задачи теории упругопластичности. Разработанные модели основаны на результатах предварительных исследований структуры композиционных материалов на основе порошковых дисперсных систем «медь – ПТФЭ – УНТ».

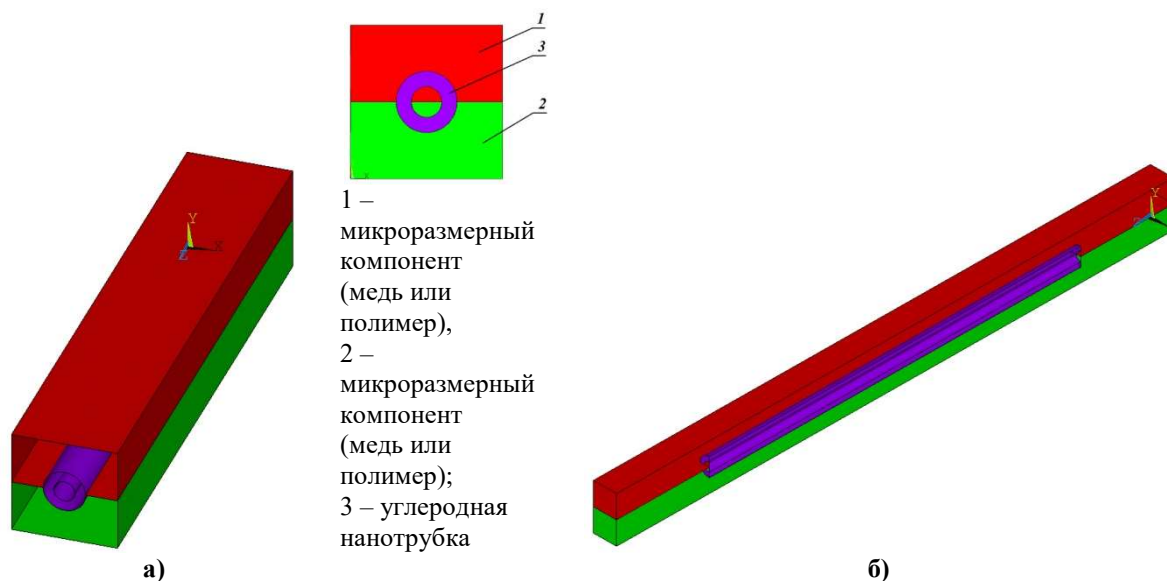


Рисунок 2 – Расчетная схема мезофрагмента металлополимерной нанонаполненной системы: а – поперечное сечение; б – продольное сечение

Разбиение модели на конечные элементы выполнено в полуавтоматическом режиме с использованием подпрограммы Mesh Tool пакета ANSYS 14.5. При создании конечно-элементной сетки учитывали, что точность метода конечных элементов зависит от правильного выбора типа и размера элементов дискретизации. Так, например, более частую сетку использовали там, где ожидался большой градиент деформаций или напряжений. В тоже время более редкую сетку применяли в зонах с более или менее постоянными деформациями или напряжениями, а также в областях, не представляющих особого интереса. При этом число расчетных узлов (Nodes) составило 18711, число элементов (Elements) – 11523, что позволило достичь приемлемого качества решения. Сгенерированная сетка модели мезофрагмента представлена на рисунке 3.

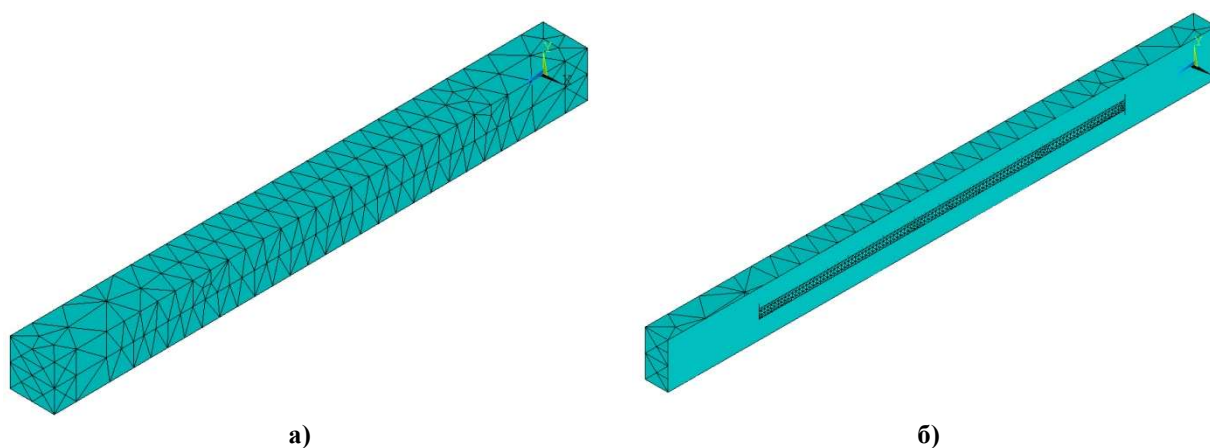


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель мезофрагмента трехкомпонентной металлополимерной системы: а – 3-D изображение (общий вид), б – продольное сечение

Для решения поставленной задачи на частицах меди была создана конечно-элементная сетка из элементов SOLID 186, содержащих 20 узлов. Каждый узел имеет три степени свободы. Применение данного элемента дискретизации оказалось наиболее удобным для моделирования неравномерной сетки при решении упруго-пластической

задачи. Моделирование контакта осуществляли посредством контактных элементов TARGE 170 и CONTA 174.

Контактные и целевые конечные элементы, составляющие контактную пару, связаны между собой посредством общего набора характеристик. Моделирование материалов осуществлялось посредством параметризации их физических свойств.

3. Исследование влияния режимов формирования нанонаполненных металлополимерных композитов на напряженное состояние областей контактного взаимодействия структурных составляющих

С использованием подходов компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния мезофрагментов контактного взаимодействия частиц поликомпонентной металлополимерной наноструктурированной порошковой системы исследовано влияние технологических параметров электроконтактного спекания на формирование напряженного состояния износостойких покрытий, установлены закономерности образования полей внутренних напряжений.

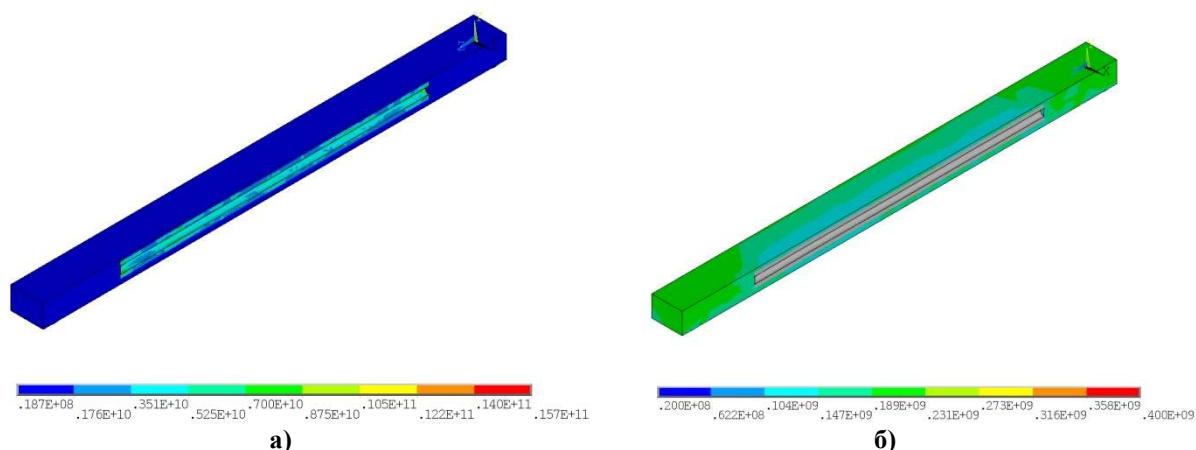


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой металлополимерной нанонаполненной системы, содержащей фрагменты двух частиц меди и УНТ, Па

Анализируя характер формирования напряженного состояния мезофрагмента порошкового покрытия, содержащего две частицы меди и УНТ можно отметить следующее (рисунок 4).

Картина распределения напряжений в УНТ неоднородна (рисунок 4, а). Максимальные эквивалентные напряжения возникают в точках, расположенных на обоих концах УНТ. При этом максимальная величина эквивалентных напряжений достигает 7000-8000 МПа. Средняя величина данных напряжений составляет 2000-3000 МПа.

Распределение эквивалентных напряжений в микроразмерных компонентах также носит неоднородный характер (рисунок 4, б). При этом значения максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в зонах контакта частиц меди, не превышают 300 МПа. Среднее значение эквивалентных напряжений в частицах меди находится в интервале от 189 МПа до 241 МПа, что достаточно для пластического деформирования частиц порошковой матрицы.

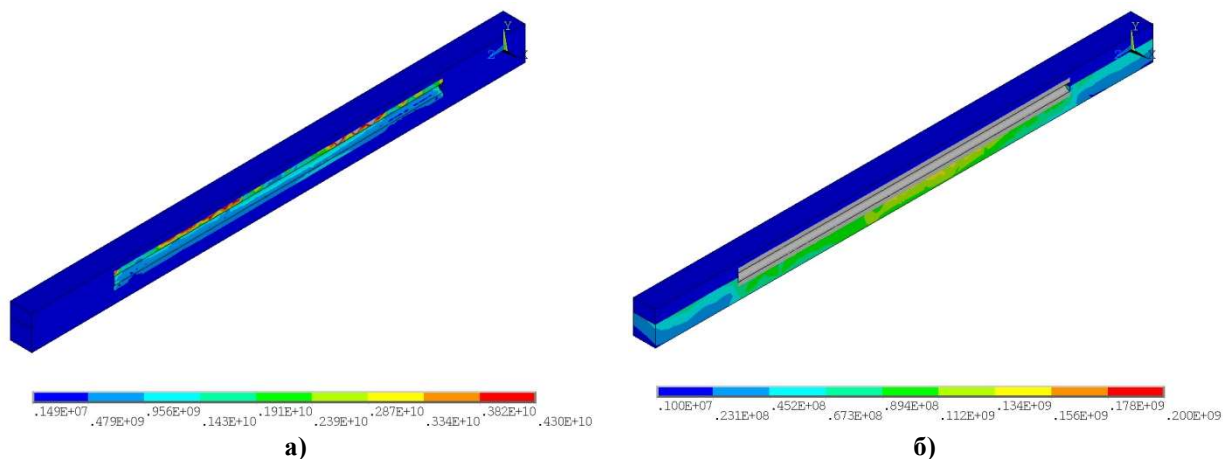


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой металлополимерной нанонаполненной системы, содержащей фрагменты частицы полимера (сверху), частицы меди (снизу) и УНТ, Па

Картина напряженного состояния мезофрагмента порошкового материала, содержащего частицу меди, частицу полимера и УНТ, представлена на рисунке 5.

Исследование напряженного состояния мезофрагмента порошковой системы, содержащей фрагмент частицы меди, фрагмент частицы ПТФЭ и одну углеродную нанотрубку, позволило установить, что напряжения в частицах меди составляют порядка 100-150 МПа, в частицах полимерного наполнителя 12-14 МПа. При этом максимальные напряжения наблюдаются в наноструктурном наполнителе. Так значения эквивалентных напряжений в УНТ достигают 3820 МПа, а их средняя величина в объеме составляет от 500 до 1000 МПа. При этом можно отметить что полимерный наполнитель подвергается сильному деформированию, а напряжения, возникающие в нем, превышают предел текучести политетрафторэтилена.

Картина напряженного состояния мезофрагмента порошкового материала, содержащего две частицы полимера и УНТ, представлена на рисунке 6.

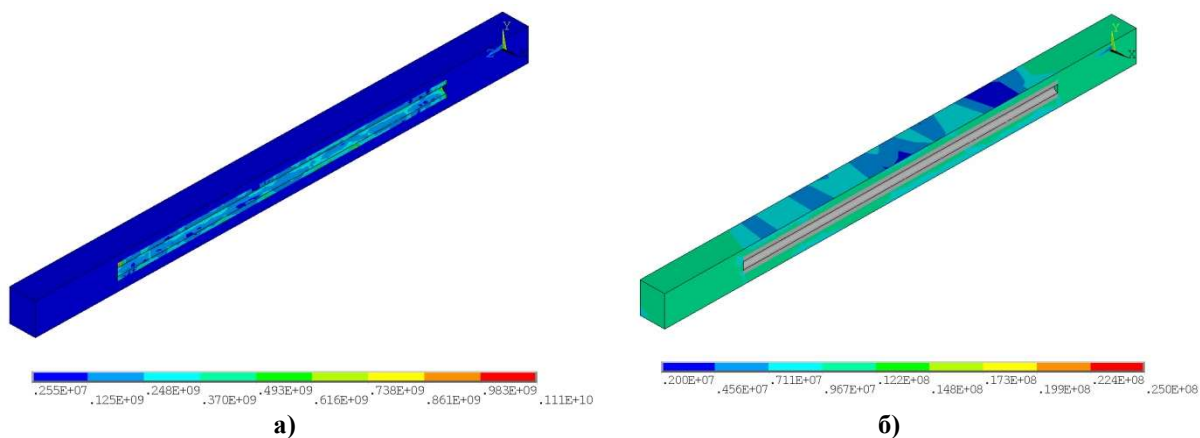


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой металлополимерной нанонаполненной системы, содержащей фрагменты двух частиц полимера и УНТ, Па

Исследуя картину распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, можно отметить следующее. Напряжения, возникающие в частицах полимерного наполнителя, достигают значений 120 МПа, что превышает их предел текучести в 10 раз. Максимальные напряжения, возникающие в некоторых точках УНТ, достигают значений 1000 МПа. При этом среднее значение эквивалентных напряжений в УНТ в данном мезофрагменте составляет порядка 125-248 МПа.

Основываясь на полученных результатах исследований можно отметить, что напряжения, возникающие в УНТ при технологическом процессе получения порошковых нанонаполненных композиционных материалов, не достигают предела прочности УНТ, что свидетельствует об их упругой работе. В результате такого эффекта углеродные нанотрубки не подвергаются критическим деформациям или разрушению.

4. Заключение

Авторами методами компьютерного моделирования проведено исследование взаимодействия нано- и микродисперсных компонентов порошковой металлополимерной системы в процессе получения композиционных материалов методом электроконтактного спекания. Для этого была разработана геометрия мезофрагмента металлополимерной системы, определены свойства материалов, граничные условия и создана конечно-элементная модель, а также выполнен расчет эквивалентных напряжений по Мизесу.

В процессе моделирования было установлено, что максимальные напряжения возникают в углеродных нанотрубках, а напряжения, возникающие в микрогабаритных частицах меди и полимера, достаточны для их деформирования. Полученные в данной работе результаты моделирования согласуются с основными положениями механики материалов и механики деформируемого твердого тела.

Благодарности

Работа представлена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках международного проекта T17MC-015 (2017-2019 гг.) «Формирование износостойких нанонаполненных металлополимерных композитов в условиях проявления локального термогенерирующего эффекта на границах контактного взаимодействия металл-полимер-наноструктуры углерода при высокоскоростном электроконтактном спекании порошковых дисперсных систем», выполняемого совместно Университетом гражданской защиты МЧС Республики Беларусь и Институтом механики Болгарской академии наук.

Литература

1. Плескачевский Ю.М., Шимановский А.О. Компьютерное моделирование структуры и свойств композитов в нагруженных конструкциях. Механика машин, механизмов и материалов, № 1 (34), 2016, с. 41-51.
2. Скворцов Ю.В. Моделирование композитных элементов конструкций и анализ их разрушения в САЕ-системах. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т. им. С.П. Королева. Электрон. 2012 (CDROM).
3. Бруяка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А. Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010, 271 с.
4. Лукьянова А.Н. Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010, 52 с.
5. Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера. М.: ЛЕНАНД, 2010, 456 с.

6. Огородникова О.М. Введение в компьютерный конструкционный анализ. Екатеринбург: Уральск. гос. техн. ун-т, 2001, 49 с.
7. Шкловец А.О. Конструкционный анализ методом конечных элементов в САЕ-пакете Ansys Mechanical. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2012, 53 с.
8. Alawadhi E.M. Finite Element Simulations Using ANSYS. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010, 408 p.
9. Huei-Huang Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 16. SDC Publ., 2015, 264 p.