

УДК 621.891:539.3

*В. Н. ПАСОВЕЦ<sup>1</sup>, В. А. КОВТУН<sup>1</sup>,  
М. МИХОВСКИ<sup>2</sup>, Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ<sup>3</sup>, А. АЛЕКСИЕВ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Гомель*

<sup>2</sup> *Институт механики Болгарской академии наук, Болгария*

<sup>3</sup> *Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого  
НАН Беларуси, Гомель*

## **ОЦЕНКА УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЗОНАХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРИ ЭЛЕКТРОМЕХАНОТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Получены данные об уровне и характере распределения напряжений, возникающих в области контактного взаимодействия между компонентами порошкового материала, включающего микроразмерные частицы меди, частицы плакированного полимера и наноструктуры углерода. При этом найденные численные значения позволяют судить о значениях напряжений в наноструктурированных порошковых материалах при воздействии сжимающей нагрузки в процессе электромеханотермического воздействия на порошковую систему.

**Введение.** Прогресс в технике, повышение требований к надежности и долговечности машин и механизмов, более жесткие режимы их функционирования требуют разработки новых эксплуатационных материалов, обеспечивающих необходимый комплекс соответствующих характеристик деталей [1]. Эффективным методом решения названной проблемы является разработка наноструктурированных композиционных материалов на основе металлической матрицы [2]. Поэтому вопросы формирования композиционных систем на основе дисперсной металлической матрицы, полимеров и наноструктурных частиц углерода (углеродные нанотрубки, углеродные нанолуковицы и другие), а также разработка научно-обоснованных методов управления их структурой и свойствами занимают одно из ведущих мест в современном материаловедении и являются предметом исследований многих научных центров мира [3–6].

Процессы структурообразования и межфазного взаимодействия компонентов в гибридных нанонаполненных дисперсных системах при электромеханотермическом воздействии определяются не только состоянием структурных элементов, но и особенностями взаимодействия отдельных компонентов с источником электрического тока. При этом исследование наиболее сложного варианта одновременного силового и температурного воздействия

при заранее неизвестных напряжениях на контуре области взаимодействия структурных элементов предусматривает решение системы взаимосвязанных внутренних межчастичных и внешних контактных задач. Кроме того, необходимо проводить предварительную оценку реакционной способности поверхности компонентов для целенаправленного выбора эффективных условий обработки гибридных нанонаполненных композитов [7].

Электромеханотермическое воздействие на сложную композиционную систему «дисперсный металл – плакированный металлом полимер – наноструктуры углерода» одновременно сопровождается пластическим деформированием материала матрицы, интенсивным выделением тепла с частичным образованием жидкой фазы в зоне физического контакта «металл – металл» и возникновением эффекта теплового удара, обусловленного резким градиентным нарастанием температуры. При этом интенсивная пластическая деформация приводит к значительным структурно-фазовым превращениям обрабатываемого материала. Одним из наиболее часто наблюдаемых следствий данного процесса является смещение температурных границ фазового перехода вещества, ведущее к сокращению времени термической обработки, сохранению исходной структуры дисперсных полимеров, когда процессы их термо- и термоокислительной деструкции практически не развиваются. Данные факторы позволяют значительно улучшить триботехнические и физико-механические характеристики гибридных нанонаполненных металлополимерных композитов при более низких энергетических затратах.

Таким образом, одной из основных задач при получении композитов на основе порошковых систем «дисперсный металл – плакированный металлом полимер – наноструктуры углерода» является исследование напряжений, возникающих в зонах контактного взаимодействия дисперсных компонентов.

**Постановка задачи и методика проведения расчета.** Разработаны расчетные схемы и конечно-элементные модели для исследования напряженно-деформированного состояния, а также изучения механизма развития процессов контактного взаимодействия компонентов наноструктурированных гибридных композитов при электромеханотермическом воздействии.

Созданные расчетные схемы и компьютерные конечно-элементные модели мезофрагментов зон межфазного взаимодействия на границах раздела в гибридных системах «дисперсный металл – плакированный политетрафторэтилен (ПТФЭ) – наноструктуры углерода» включают в себя:

- 1) две частицы меди размером 50 мкм, одну частицу плакированного ПТФЭ размером 150 мкм с толщиной медного слоя 6 мкм, одну углеродную нанотрубку (УНТ) с внутренним диаметром 60 нм и внешним диаметром 100 нм, расположенную вертикально в наноразмерной поре (рисунок 1);
- 2) две частицы меди размером 50 мкм, одну частицу плакированного ПТФЭ размером 150 мкм с толщиной медного слоя 6 мкм, одну углеродную нанотрубку с внутренним диаметром 60 нм и внешним диаметром 100 нм, расположенную горизонтально в наноразмерной поре (рисунок 2);

3) две частицы меди размером 50 мкм, одну частицу плакированного ПТФЭ размером 150 мкм с толщиной медного слоя 6 мкм, две углеродные нанотрубки с внутренним диаметром 60 нм и внешним диаметром 100 нм, расположенные перпендикулярно друг относительно друга в наноразмерной поре (рисунок 3);

4) две частицы меди размером 50 мкм, одну частицу плакированного полимера размером 150 мкм с толщиной медного слоя 6 мкм, две луковичные наноструктуры углерода (ЛНУ) с внешним диаметром 360 нм (рисунок 4).

Разработанные компьютерные модели базируются на результатах микроструктурных исследований, проведенных с помощью сканирующей электронной микроскопии (рисунок 5), и имеют определенную степень идеализации, в частности не учитывается расстояние между слоями УНТ и ЛНУ, составляющее  $\approx 0,34$  нм, так как оно во много раз меньше по сравнению с размерами наночастиц углерода.

Деформирование элементов структуры порошкового материала происходит в соответствии с упруго-пластической моделью: частиц меди (модуль Юнга  $E_m = 110$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu_m = 0,37$ ), однослойной УНТ ( $E_{унт} = 2000$  ГПа,  $\nu_{унт} = 0,18$ ), луковичной наноструктуры углерода ( $E_{лну} = 2210$  ГПа,  $\nu_{лну} = 0,15$ ), частицы политетрафторэтилена ( $E_n = 0,49$  ГПа,  $\nu_n = 0,45$ ). Используя допущение о равномерном распределении частиц меди и прикладываемого давления прессования, принято, что на каждый выделенный мезофрагмент материала действует сжимающая сила  $1,44 \cdot 10^{-3}$  Н. Названная сила определена из условия, что сила прессования на опытно-промышленной установке для электроконтактного спекания равна 12 000 Н, а площадь зоны спекания составляет порядка 15 мм<sup>2</sup>.

Разработанные компьютерные модели имеют ограниченную возможность перемещения нижних границ. Оценка НДС проводилась на основе решения плоской задачи теории упругости.

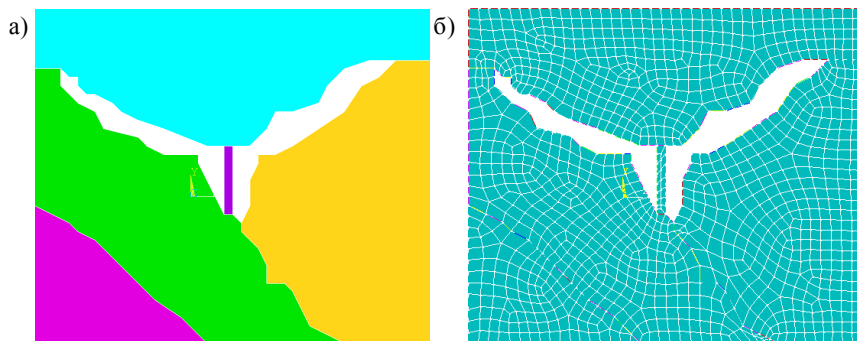


Рисунок 1 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель (б) мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с нанотрубкой, расположенной вертикально

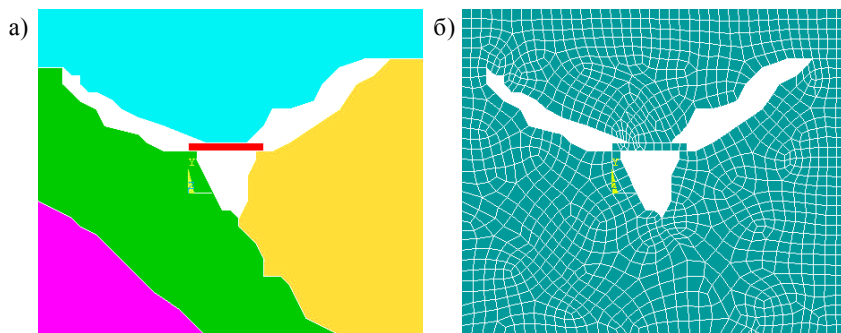


Рисунок 2 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель (б) мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с нанотрубкой, расположенной горизонтально

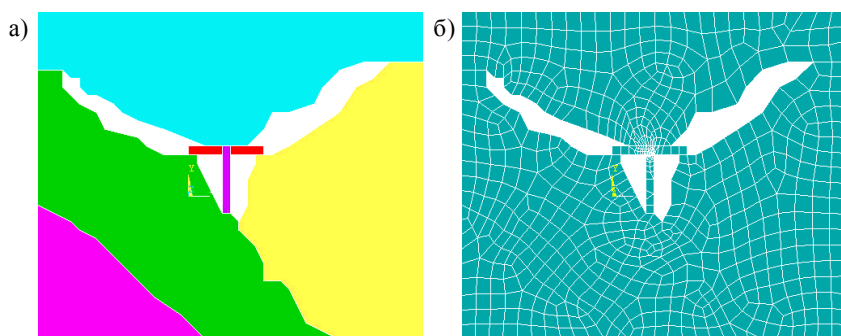


Рисунок 3 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель (б) мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с нанотрубками, расположенными перпендикулярно друг относительно друга

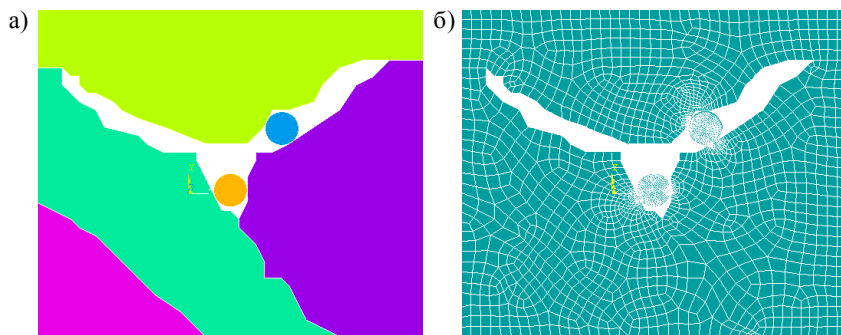


Рисунок 4 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель (б) мезофрагмента зоны контактного взаимодействия с двумя луковичными наноструктурами углерода

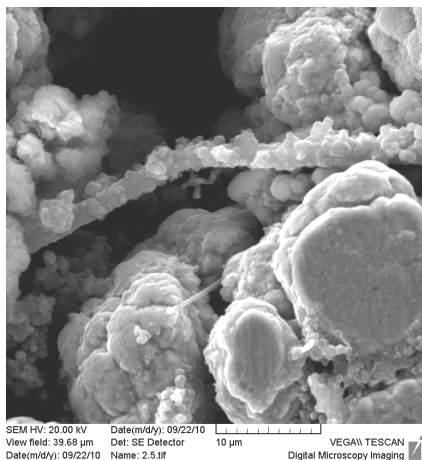


Рисунок 5 – Микроструктура композиционного материала на основе порошковой системы «дисперсная медь – плакированный медью политетрафторэтилен – наноструктуры углерода»

Для исследования НДС и теплового состояния областей контактного взаимодействия компонентов порошковых систем использован метод конечных элементов, реализованный в программном пакете ANSYS 14.5 [8] (см. рисунки 1–4). При создании конечно-элементной сетки учитывалось, что точность расчета методом конечных элементов зависит от правильного выбора типа и размера элементов дискретизации. Так, например, более частая сетка использовалась там, где ожидался большой градиент деформаций или напряжений. При решении поставленной задачи на частицах меди была создана конечно-элементная сетка из плоских четырехугольных элементов PLANE182, содержащих четыре узла. Каждый узел имел две степени свободы. Применение данного элемента дискретизации для моделирования неравномерной сетки плоской модели на частицах меди оказалось наиболее удобным, так как в нем заложена возможность пластической деформации. При моделировании процесса контактного взаимодействия исходных компонентов порошковых материалов использовались специальные элементы TARGE169 и CONTA172.

**Анализ результатов.** С использованием подходов компьютерного моделирования плоского напряженно-деформированного состояния получены и исследованы поля распределения эквивалентных напряжений в областях контактного взаимодействия композиционных нанонаполненных систем дисперсный металл – углеродные нанотрубки. Анализируя характер формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) мезофрагмента порошкового композиционного материала, содержащего две частицы меди, одну частицу плакированного полимера, одну углеродную нанотрубку с внутренним диа-

метром 60 нм и внешним диаметром 100 нм, расположенную вертикально в наноразмерной поре (рисунок 6), можно сделать ряд выводов. Распределение эквивалентных напряжений в УНТ носит неоднородный характер, при этом максимальные их значения достигают 1440 МПа. Среднее значение эквивалентных напряжений в УНТ составляет 1300–1360 МПа. В то же время величина напряжений непосредственно в частицах меди не превышает 560 МПа и наблюдается в зоне контактного взаимодействия «медь – УНТ». Среднее значение напряжений по Мизесу в частицах меди и медной оболочке полимера составляет 280–320 МПа, что выше предела текучести меди. В результате наблюдается процесс пластического деформирования дисперсных частиц меди с одновременным уменьшением объема образованных пор. Однако вертикальное расположение УНТ в поровом пространстве материала затрудняет протекание данного процесса, что оказывает определенное влияние на структурообразование нанонаполненных композиционных систем. Среднее значение напряжений по Мизесу в частицах полимера составляет 7–10 МПа.

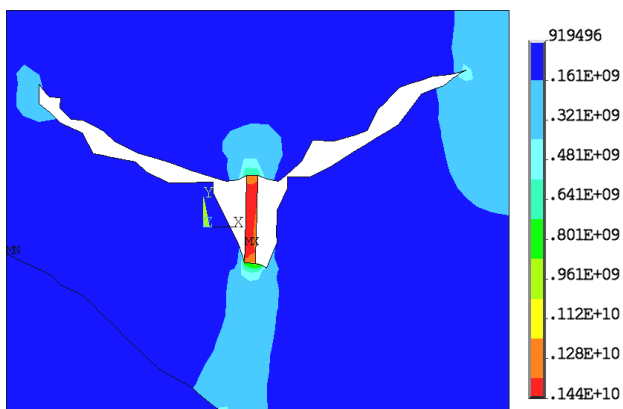


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы, содержащей две частицы меди, одну частицу плакированного полимера и одну УНТ, расположенную вертикально в наноразмерной поре, Па

Проведенные исследования характера распределения эквивалентных напряжений в мезофрагменте, содержащем две частицы меди, одну частицу плакированного полимера, одну УНТ, расположенную горизонтально в наноразмерной поре, показали, что он также носит неоднородный характер (рисунок 7). При этом среднее значение эквивалентных напряжений в УНТ составляет 1700–1900 МПа. Максимальные эквивалентные напряжения возникают в зоне контакта «боковая поверхность УНТ – верхняя частица меди», имеют локальный характер и достигают значения 2830 МПа. В то же время напряжения в частицах меди не превышают 315 МПа, а их среднее значение

составляет 250–280 МПа. Таким образом, в случае горизонтального расположения УНТ в поровом пространстве происходит значительное уменьшение объема пор по сравнению со случаем вертикального расположения. При этом сформированный нанонаполненный композиционный материал будет иметь более низкую пористость. Среднее значение напряжений по Мизесу в частицах полимера составляет 9–12 МПа.



Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы, содержащей две частицы меди, одну частицу плакированного полимера, одну УНТ, расположенную горизонтально в наноразмерной поре, Па

Картина напряженно-деформированного состояния нанонаполненной порошковой системы в области мезофрагмента, содержащего две частицы меди, одну частицу плакированного полимера, две углеродные нанотрубки, расположенные перпендикулярно друг относительно друга в наноразмерной поре (рисунок 8) имеет следующие особенности. Напряжения, возникающие внутри УНТ, достигают 970 МПа, а их среднее значение составляет 650–700 МПа. Средние эквивалентные напряжения в частицах меди 200–220 МПа, а максимальное напряжение в зоне контакта частиц меди достигает 300 МПа. Горизонтальное расположение УНТ затрудняет деформирование меди. Среднее значение напряжений по Мизесу в частицах полимера составляет 7–10 МПа.

Картина напряженно-деформированного состояния нанонаполненной порошковой системы в области мезофрагмента, содержащего две частицы меди, одну частицу плакированного полимера, две луковичные наноструктуры углерода (рисунок 9) также имеет ряд особенностей. Напряжения, возникающие внутри одной из ЛНУ, носят неоднородный характер и достигают 740–760 МПа, а их среднее значение составляет 500–550 МПа. Напряжения, возникающие внутри второй ЛНУ, носят однородный характер и их среднее значение составляет 250–260 МПа. Средние эквивалентные напряжения в частицах меди составляют 250–260 МПа, а его максимальное значение в зо-

не контакта частиц меди и ЛНУ достигает 500 МПа. Можно отметить, что такое расположение ЛНУ не затрудняет деформирование меди. Изменению размера поры препятствует только одна ЛНУ.

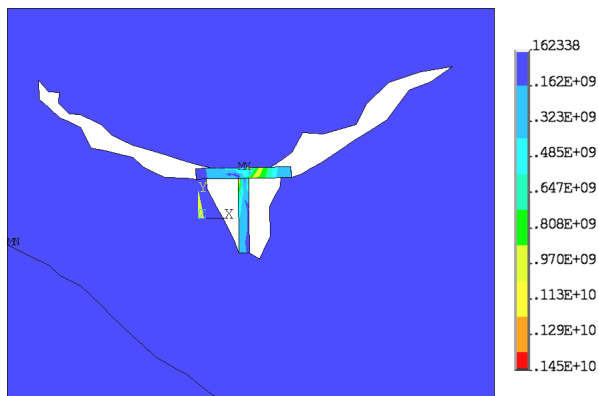


Рисунок 8 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы, содержащей две частицы меди, одну частицу плакированного полимера, две углеродные нанотрубки, расположенные перпендикулярно друг относительно друга в наноразмерной поре, Па



Рисунок 9 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в области контактного взаимодействия компонентов порошковой системы, содержащей две частицы меди, одну частицу плакированного полимера, две луковичные наноструктуры углерода, Па

Основываясь на результатах представленных исследований, можно отметить, что напряжения, возникающие в УНТ и ЛНУ при технологическом процессе получения порошковых нанонаполненных композиционных материалов, не достигают предела прочности. Это свидетельствует об упругой



работе нанотрубок и луковичных наноструктур углерода, которые не подвергаются критическим деформациям или разрушению.

Необходимо отметить, что после достижения в частицах меди и плакированного полимера напряжений, превышающих предел текучести материала, происходит их пластическое деформирование. Материал частиц стремится заполнить межчастичное пространство. Как следствие, снижается размер пор и повышается плотность материала. В то же время увеличение размеров контактных площадок на поверхности частиц приводит к снижению контактного сопротивления между частицами.

**Заключение.** В результате проведенных исследований получены данные о характере распределения напряжений, возникающих в области контактного взаимодействия между компонентами порошкового материала, включающего микроразмерные частицы меди, частицы плакированного полимера и наноструктуры углерода. При этом найденные численные значения позволяют судить о величине возникающих напряжений в наноструктурированных порошковых материалах при воздействии сжимающей нагрузки, что необходимо учитывать при осуществлении реальных технологических процессов получения новых композитов, обладающих высокими физико-механическими и триботехническими характеристиками.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта Г13МС-008.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Ковтун, В. А. Металлоуглеродные композиционные порошковые материалы для ответственных узлов машин и механизмов: [монография] / В. А. Ковтун, В. Н. Пасовец, Ю. М. Плещачевский. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 283 с.

2 **Исследование влияния режимов электромеханотермического воздействия на свойства нанонаполненных триботехнических покрытий** / В. А. Ковтун [и др.] // Научни известия на НТСМ. – 2013. – Т. 21, № 2(139). – С. 84–88.

3 Gleiter, H. Nanostructured materials: basis concepts and microstructure / H. Gleiter // Acta Mater. – 2000. – Vol. 48, № 1. – P. 1–29.

4 **Nanostructured Materials and Technology** / ed. by H. S. Niiwa. – Elsevier, 2001. – 864 p.

5 Пул, Ч. Нанотехнологии: пер. с англ. / Ч. Пул, Ф. Ю. Оуэнс. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.

6 Гельчинский, Б. Р. Нанодисперсные порошки цветных металлов и наноструктурные материалы на их основе / Б. Р. Гельчинский, Л. В. Золотухина, М. В. Вахрушев // Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь – Россия – Украина (НАНО – 2008) / редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2008. – С. 190.

7 Витязь, П. А. Основы нанотехнологий и наноматериалов / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович. – Минск: Изд. центр БГУ, 2011. – С. 3–12.

8 ANSYS [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ansys.com>. – Date of access: 02.12.2013.

*V. N. PASOVETS, V. A. KOVTUN, M. MIHOVSKI, YU. M. PLESKACHEVSKII,  
A. ALEKSIEV*

**EVALUATION OF STRESS LEVELS  
APPEARING IN CONTACT INTERACTION ZONES  
OF NANOSTRUCTURED METAL-POLYMER SYSTEMS  
DISPERSED COMPONENTS UNDER ELECTROMECHANICAL LOADING**

There were obtained the data on the level and distribution pattern of stresses appearing in the area of contact interaction between the components of the powder material, including micro-sized particles of copper, clad polymer particles and carbon nanostructures. In this case, the numerical results allow to judge about the stresses values in nanostructured powder materials under the compressive load in the process of the electromechanical impact on powder system.

Получено 17.09.2014

---

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 8. Гомель, 2014**

---

УДК 796.01:531.3

*А. Е. ПОКАТИЛОВ<sup>1</sup>, В. И. ЗАГРЕВСКИЙ<sup>2</sup>, Д. А. ЛАВШУК<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Могилевский государственный университет продовольствия, Беларусь*

<sup>2</sup>*Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, Беларусь*

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
МОЩНОСТИ МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМЫ СПОРТСМЕНА**

Разработаны механо-математические модели для расчета мощности целенаправленного движения спортсмена с учетом его взаимодействия с упругой опорой. Выполнено экспериментальное определение мощности мышечной системы спортсмена в зависимости от положения центра масс человека при выполнении им большого оборота на перекладине. На основе математических моделей и данных вычислительного эксперимента на ПЭВМ предложен метод оценки влияния деформации спортивного снаряда на мощности, развиваемые непосредственно мышечной системой гимнаста и реакцией упругой опоры. Получена количественная картина распределения мощности мышечной системы на всем протяжении траектории движения спортсмена. Рассчитаны коэффициенты влияния опоры по мощности.

**Введение.** Управляемое движение спортсмена может быть описано математическими моделями на кинематическом и динамическом уровнях. При исследовании динамики движения используют модели, основанные на анализе кинетической энергии, момента количества движения относительно оси спортивного снаряда или общего центра масс системы, а также моментов управляющих сил мышечной системы [1, 2].