



МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА  
(МГУ)  
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ

Ленинские горы, Москва, ГСП-1, 119234

Телефон: 939-12-44, Факс: 939-20-90

<http://www.math.msu.su>

11.12.2020 № 218-20/101-03

На № \_\_\_\_\_

Отзыв официального оппонента на диссертацию **Маковского Сергея Владимировича** «Динамические характеристики модифицированных волокнистых композитов с вискеризованными волокнами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04-«Механика деформируемого твердого тела»

**Актуальность темы диссертации и соответствие специальности.**

Появление и интенсивное внедрение новых материалов в современное машино- и приборостроение вызвало быстрый рост интереса к изучению зависимости их физико-механических свойств от внутренней структуры. Следовательно, возникла потребность в разработке новых методов расчета и проектировании нужных для практического применения композиционных материалов, изготавливаемых из этих материалов, а также в создании обобщенной теории для изучения свойств деформирования материалов с микроструктурой. Особенно актуальными эти проблемы стали в последние три десятилетия, когда появились возможности управления структурой материала на уровне отдельных молекул и даже атомов. Композитные конструкции с различными комбинациями компонентов в структуре имеют много преимуществ по сравнению монолитными однородными материалами. Известно, что механические свойства композитов контролируются условиями контакта между волокном и матрицей (характеристиками интерфейса) в композите. Влияние структуры в области контакта фаз оказывает значительное влияние на сдвиговые характеристики композитов. В этой связи разработаны различные способы для повышения качества интерфейса, наиболее распространенными из которых являются такие как: модификация поверхности волокна, улучшение химических взаимодействий, либо добавление третьей фазы (межфазного слоя) между волокном и матрицей. Основная проблема здесь заключается в улучшении межфазных адгезионных свойств и увеличении площади поверхности волокна для более эффективной передачи нагрузок между волокнами и матрицей, так что поведения композитов соответствовали их эксплуатационным потребностям. В настоящее время активно развиваются технологии получения современных волокнистых композитов, в которых для повышения сдвиговых свойств композита на круговой поверхности углеродных волокон выращены специальные микроструктуры, содержащие нановолокна (вискерсы), нанопроволоки и углеродные нанотрубки (волокна «fuzzy»). Исследования показали, что для подобных систем существенно повышается сдвиговая прочность межфазной границы (интерфейса). Итак, композиционные материалы с вискеризованными волокнами обладают более высокими характеристиками прочности и жесткости при сдвиге по сравнению типовыми композитами, которые не имеют дополнительной микроструктуры на поверхности волокон. Кроме того, присутствие

микроструктур на границах фаз повышает трансверсальную прочность и жесткость, а также демпфирующие характеристики и электропроводность композитов. Следует отметить, что улучшение свойств композитов зависит от характеристик вискерсов и матрицы межфазного слоя, выращенных на поверхности волокна. Композиционные материалы на их основе являются современными мультифункциональными композиционными материалами, так как различные их свойства такие, как прочность, жесткость, демпфирование, усталость, и электро- и теплопроводность могут быть улучшены одновременно. В этой связи прогнозирование свойств современных мультифункциональных волокнистых композитов представляет теоретические и практические интересы. Поэтому тема диссертации, посвященная моделированию диссипативных характеристик волокнистых композитов с модифицированными волокнами, имеющими дополнительный вискеризованный слой и разработке алгоритмов аналитической оценки эффективных свойств межфазного слоя и композита в целом, несомненно, является весьма важной и актуальной проблемой. Следует еще заметить, что в литературе пока мало известна модель, определяющая эффективные диссипативные свойства. В этой связи моделирование эффективных упругих и диссипативных свойств вискеризованных волокнистых композитов с учетом характеристик вискерсов в вискеризованном межфазном слое является весьма важной и актуальной проблемой. Следовательно, даже моделирование эффективных упругих и диссипативных свойств вискеризованных волокнистых композитов с целью улучшения их надежности при эксплуатации также является весьма важной и актуальной проблемой. Итак, тема диссертационной работы Маковского Сергея Владимировича является актуальной и соответствует специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, содержит 120 страниц основного текста, 9 страниц список использованных источников, 83 рисунка, из которых 59 демонстрационного характера для различных материалов, а на 24 рисунках представлены графики. Список используемой литературы включает 104 наименования, из них 86 на иностранном языке.

**Во введении**, в соответствии с требованиями к содержанию и оформлению диссертационных работ, автором формулируются актуальность, научная новизна, цели и задачи исследования. Кроме того, обоснована теоретическая и практическая значимость, приведены результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан обзор работ по рассматриваемой в диссертационной работе проблеме. Приведены некоторые сведения о вискеризованных волокнах и композитах, которые содержат вискеризованные компоненты. В частности, отмечается, что прочность интерфейса на сдвиг полимерных композитов на основе углеродных волокон, вискеризованных графитовыми микровискерсами, улучшается в 3-5 раз. Однако следует отметить, что один из существенных недостатков использованной технологии производства таких композитов заключается в том, что механические процессы, которые породили микровискерсы на поверхности волокон, существенно уменьшали предельную прочность на растяжение базовых волокон и, следовательно, прочность и жесткость композитов значительно уменьшились. В этой связи исследования в рамках этой технологии в течение достаточно долгого времени были приостановлены. В настоящее время, т.е. в эпоху нанотехнологии эта технология возобновилась. В

частности, углеродные нанотрубки, которые стали доступными с 1990-х годов, используются для нанесения на поверхность углеродного волокна. Полученное таким образом волокно именуется волокном «Фуззи». Экспериментально доказано, что при наличии нанотрубок, выращенных на поверхности волокна, прочность интерфейса на сдвиг композита существенно повышается. Так как нанотрубки выращены в перпендикулярном направлении волокон, то сжимающая прочность композита в том же направлении возрастает значительно. Кроме того, следует заметить, что приведенные исследования показали, что плотность, длина и ориентация нанотрубок могут влиять на поведение таких композитов. Однако, к сожалению, аналогично предшественнику и этот тип волокна отличается существенным сокращением жесткости и прочности на растяжение. Это связано с высокой температурой, используемой при нанесении растущих нанотрубок на поверхность волокна. Хотя, Штейнер и др. разработали новые методики производства волокон «Фуззи» без повреждения базового волокна.

Помимо нанотрубок в nano-армированных материалах также используются нанопроволоки и наностержни. Например, Ванг и др. создали нанопроволоки теллурида кадмия (CdTe), вискеризованные нанопроволоками кремния оксида (SiO<sub>2</sub>). Эта наноструктура похожа на nano-многоножки. Она состоит из трех компонентов: 1) твердая базовая нанопроволока из теллурида кадмия (CdTe), 2) покрытие из кремния оксида (SiO<sub>2</sub>) и 3) нанопроволоки из кремния оксида (SiO<sub>2</sub>).

Ученые Лин и др. и Галан и др. получили новый аналогичный композиционный материал без применения высокой температуры. Они создали углеродные волокна, вискеризованные нанопроволоками из оксида цинка (ZnO). В этой волокнистой структуре нанопроволоки выращены на поверхности волокна перпендикулярно с высокой плотностью. Такой композит имеет четыре слоя: 1) твердое базовое углеродное волокно марки IM7, 2) покрытие из оксида цинка, 3) вискеризованный межфазный слой, который состоит из нанопроволок оксида цинка и полимерной матрицы и 4) полимерная матрица. При этом нанопроволоки смочены матрицей полностью.

Согласно экспериментальным данным сегментационного теста единичного волокна, изменяя диаметр (50-200 нм) и длину (0,2-1,6 мкм) нанопроволоки, можно повышать сдвиговую прочность интерфейса до 228%, т.е. при увеличении диаметра и длины нанопроволок, повышается прочность интерфейса на сдвиг композита. Здесь интересными являются результаты, полученные при испытании образца с V-образным вырезом («V-notch shear testing-ASTM 5379») на сдвиг для модуля продольного сдвига. С помощью этого эксперимента установлено, что средний модуль сдвига композита с нанопроволоками по сравнению с композитом без нанопроволок повышается на 37,5%.

Следует отметить, что в работах авторов «Лин и др. и Галан и др.» описывают область, содержащую нанопроволоки и матрицу как межфазный слой между волокном и матрицей, а также два интерфейса: волокно-оксида цинка(ZnO) и оксида цинка(ZnO)-матрица. Эти интерфейсы по сравнению с интерфейсом волокно-матрицы обладают более высокой прочностью. При этом интерфейс волокно-оксида цинка(ZnO) имеет лучшее прилипание чем интерфейс волокно-матрицы, а интерфейс оксида цинка(ZnO)-матрица — более сильное взаимодействие, не только за счет лучшего прилипания, а также и из-за большей поверхности контакта. Поэтому, композит на их основе становится более прочным материалом. Заслуживает внимания тот факт, что хотя нанопроволоки главным образом выращены перпендикулярно к поверхности волокна, они в матрице ориентированы случайным образом. Интересно также, что этот тип волокнистой системы не теряет прочностных свойств после роста нанопроволок.

Кроме полимерных композитов, армированных вискеризованными волокнами, применяются также композиционные материалы на основе металлических матриц, армированных вискеризованными металлическими волокнами. В последнее время разрабатываются композиты на основе алюминия, армированные непрерывными волокнами оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). Для улучшения механического контакта с матрицей, длинные волокна оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) подвергаются вискеризации вискерсами (карбид кремния ( $SiO_2$ ), титана оксида ( $TiO_2$ ), муллита ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) и т.д.) непосредственно в процессе изготовления композита. При изготовлении вокруг волокон образуется межфазный слой, в зависимости от состава матрицы.

Из приведенного в диссертационной работе обзора видно, что вискеризованные волокнистые композиты являются многофазными структурами. Они могут быть армированным волокнами, вискеризованными вискерсами (нанотрубками). Кроме того, они могут быть армированными волокнами, вискеризованными нанопроволоками, а также армированными вискеризованными волокнами оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). При этом вискеризованный межфазный слой является нанокомпозитом, который состоит из вискерсов и матрицы. Следовательно, механические свойства такого слоя зависят от нескольких параметров вискерсов в слое. В частности, от плотности (количества), длины, диаметра, ориентации, типа материала и др. Однако не всякая модель учитывает одновременно эффекты плотности, диаметра, длины, объемной доли и свойства вискерсов в вискеризованном межфазном слое композита при определении эффективных свойств такого композита.

Далее в этой главе обсуждаются основные фундаментальные подходы гомогенизации композиционных материалов. В этой связи для макромасштабной среды выписаны статические уравнения равновесия относительно компонент тензора напряжений с учетом объемных сил, соотношения Коши, кинематические и статические граничные условия с компонентами постоянных тензоров деформаций и напряжений соответственно, обобщенный закон Гука. Те же самые соотношения выписаны и для микромасштабной ячейки при условии, что уравнения равновесия выписаны без учета объемных сил. Выписаны также обобщенный закон Гука для ортотропного упругого тела в матричной форме. Уравнения равновесия, соотношения Коши и обобщенный закон Гука для ортотропного упругого тела представлены и в цилиндрической системе координат. Далее обсуждаются методы определения эффективных характеристик композита. В частности, обсуждаются прямой метод, метод на основе объемного осреднения, энергетический метод, а также другая технология реализации энергетического метода, основанная на приращении энергии взаимодействия. При всех этих методах выписаны необходимые соотношения с помощью эффективных величин. Наконец, в последнем параграфе этой главы дана иллюстрация принципа упруго-вязкоупругой аналогии комплексных модулей на простом примере. Выписаны соответствующие соотношения.

**Во второй главе** предлагается прикладная модель вискеризованного межфазного слоя в виде трансверсально-изотропной структуры с цилиндрической изотропией, рассматривается представительный объем для волокнистого композита с плоскостью изотропии нормальной базовым волокнам, у которой есть 3 фазы. Исследуемый композит с межфазным слоем является трансверсально-изотропным и характеризуется пятью модулями упругости. Считается, что ось  $z$  совпадает с направлением волокна, межфазные слои в композите не пересекаются друг с другом, а вискерсы выращены нормально поверхности базового волокна. При моделировании вискеризованных слоев принимается, что они являются трансверсально-изотропными с поверхностью

изотропии поперек вискерсов, т.е. структура считается цилиндрически ортотропной с постоянными свойствами по длине вискерсов. При этом вискерсы обладают свойствами длинных микро- или нановолокон.

Для получения эффективных свойств композита сначала находятся эффективные свойства цилиндрически ортотропной вискеризованной фазы, а затем, используя метод Эшелби для ортотропного многофазного композита, а также метод на основе полидисперсной модели (метод двух фаз) и метод комплексных потенциалов, определяются эффективные механические свойства вискеризованного волокнистого композита. При этом два последних метода исследуются для сравнительного анализа.

Следует отметить, что для композита с цилиндрическими включениями рассматриваются две постановки задач — в плоскости изотропии и в перпендикулярной к ней плоскости. Эффективный объемный модуль при плоской деформации и модуль поперечного сдвига определяются из решения задач всестороннего растяжения (сжатия) поперек волокон и чистого сдвига в трансверсальной плоскости, которые решаются в цилиндрической полярной системе координат. Модуль продольного сдвига определяется из решения задачи чистого сдвига вдоль волокон. Эффективные модуль Юнга и коэффициент Пуассона в направлении волокон определяются из решения задачи об одноосном растяжении (сжатии) в цилиндрической системе координат. Эффективный коэффициент Пуассона определяется как отношение поперечной эффективной деформации к продольной деформации при растяжении вдоль волокон. Далее, применяя эти найденные характеристики, можно найти другие характеристики с помощью формул, приведенных в Приложении. Кроме того, для нахождения эффективных механических свойств композита в каждой задаче определяются допустимые поля перемещений во всех указанных ортотропных фазах композита.

**В третьей главе** впервые произведена оценка динамических характеристик вискеризованного межфазного слоя модифицированного композита как отдельного волокнистого композита с учетом различных характеристик его компонентов с применением метода осреднения. Исследовано поведение характеристик в зависимости от объемной доли включений и показана зависимость этой объемной доли от длины вискерса. Наиболее значимые эффекты заключаются в следующем:

В качестве вискерсов предпочтительнее использовать вискерсы из углеродных нанотрубок (УНТ), поскольку они не только не оказывают негативного влияния на прочностные характеристики базового волокна, но и армированный ими межфазный слой стабильно показывает большие значения искомых модулей потерь относительно слоя, армированного вискерсами из оксида цинка ( $ZnO$ ), во всем диапазоне концентраций. Причем при оптимальных значениях объемного содержания вискерсов относительный рост значений модуля потерь в зависимости от материала вискерсов составляет примерно 10 раз в пользу УНТ. В случае технологически возможных значений объемной доли включений при у корня вискерса вблизи поверхности базового волокна характеристики слоя с УНТ способны вдвое превышать значения модулей потерь для слоя, армированного волокнами из оксида цинка ( $ZnO$ ), при объемном содержании вискерсов в слое что соответствует внешней границе широкого слоя с вискерсами длиной порядка 2 мкм относительный рост составляет порядка 10%, прирост модуля потерь составляет уже в районе 20% в пользу слоя армированного УНТ и продолжает стремительно расти с ростом концентрации включений. Рост показателей эффективного модуля потерь межфазного слоя, относительно модуля потерь исходной матрицы при концентрациях вискерсов в слое равных с учетом использования

различных методов осреднения, примерно составляет 2-3, 3,5-6 и 12-22 раз соответственно для межфазного слоя вискеризованного УНТ, и 2-2,5, 3-5 и 8-11 раз для слоя вискеризованного оксида цинка (ZnO). В качестве матрицы вискеризованного межфазного слоя предпочтительнее использовать вязкоупругий полимер с характеристиками ниже температуры стеклования  $T_g$ , не смотря на меньшее значение динамического модуля упругости относительно той же характеристики эпоксидной матрицы, поскольку представляет интерес характер поведения демпфирующих свойств рассматриваемого межфазного слоя в зависимости от характеристик его компонент и их концентраций. При определении модуля потерь межфазного слоя выбор матрицы имеет гораздо большее значение, чем материал вискерсов, которые лишь усиливают уже имеющиеся базовые демпфирующие характеристики матрицы и могут дать высокие пиковые характеристики при недостижимо малых объемных долях матрицы в слое.

Метод осреднения Рейсса, используемый в работе при определении эффективных демпфирующих характеристик вискеризованного межфазного слоя, является алгебраически более простым и, следовательно, удобным в применении по сравнению с более точным, но алгебраически сложным методом трех фаз, который так же применялся в работе для определения эффективных демпфирующих характеристик межфазного вискеризованного слоя. Полученные характеристики потерь межфазного слоя, определенные при использовании метода Рейсса стабильно показывают более низкие величины, однако характер распределения величин искомых модулей в зависимости от объемной доли включений в слое идентичен методу трех фаз. Найдя по методу Рейсса и методу трех фаз модули потерь поперек волокон, а так же модули потерь продольного и поперечного сдвига и сравнивая полученные результаты, имеем следующую картину: средняя разность модуля, наблюдаемое в технологическом диапазоне варьируется в диапазоне 20% в пользу более высоких характеристик, получаемых при использовании метода трех фаз. Следует заметить, что уровень разброса характеристик растет с увеличением объемной доли вискерсов в слое. Следует заметить также, что уровень разброса характеристик зависит, в том числе и от применяемого при их определении метода. В частности, модуль потерь продольного сдвига показывает стабильные показатели отличия результатов, полученных с использованием метода трех фаз и Рейсса. Для модуля потерь поперечного сдвига наблюдается иная картина, при которой наблюдается очень малый разброс для слоя, армированного вискерсами из оксида цинка (ZnO), и чрезвычайно высокий для слоя вискеризованный УНТ, притом разница тем ярче выражена чем больше отношение жесткости вискерсов к исходному модулю потерь матрицы. В случае поперечного модуля потерь характер разброса более похож на вариант разброса модуля потерь продольного сдвига. Были получены характеристики модулей потерь при помощи двух различных методов осреднения и проведена оценка характера разброса полученных величин, искомых модулей потерь с учетом присущих им особенностей. На основании полученных оценок особенностей характера поведения вискеризованного слоя модифицированных композитов можно сделать следующий вывод: метод Рейсса может быть применен для экспресс-оценки характера поведения интересующих модулей потерь композита с получением приближенных и несколько заниженных значений определяемых величин.

**В четвертой главе** приведены оценки эффективных свойств демпфирования композит, связанных с трансверсальными деформациями, которые строятся с учетом свойств демпфирования вискеризованных слоев. Рассматриваются случаи возможной замены связующего в слоях вискеризации с эпоксидной матрицы на свойства

вязкоупругого полимера при температуре стеклования и ниже температуры стеклования. Указывается класс композитов, в которых можно достичь высоких демпфирующих характеристик (вязкоупругий полимер при температуре стеклования), оценки эффективных свойств делаются на основе самосогласованного метода Эшелби и на основе упрощенных оценок типа Рейса для трехфазного материала.

**В заключении** перечислены основные результаты работы, составляющие основу проведенного исследования, имеющие научную новизну и практическую ценность.

**В приложениях** в таблице 1 приведены параметры материалов связующих и армирующих материалов композита и его вискеризованного межфазного слоя, даны рисунки трансверсально-изотропных сред с плоскостями изотропии, нормальной к осям 1 и 3 и для них и для изотропной среды выписаны соответствующие физические соотношения. Приведены доказательства теорем о средней деформации и о среднем напряжении, сформулирована теорема Клапейрона и выписана его формула, дан вывод формул Эшелби. Приведено доказательство равенства нулю неизвестной константы  $D_2^{N+1}$  для задач всестороннего нагружения поперек ячейки, чистого сдвига вдоль ячейки (волокон), одноосного растяжения вдоль волокон, чистого сдвига в плоскости изотропии.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Предложен способ для оценки демпфирующих свойств модифицированного композита с вискеризованным слоем, основанный на рассмотрении межфазного слоя как отдельной волокнистой структуры, учитывающий геометрические и механические характеристики компонент межфазного слоя на поверхности волокон, позволяющий определить эффективные демпфирующие свойства вискеризованного слоя методом трех фаз Эшелби-Кристенсена, как одной из фаз модифицированного волокнистого композита.

Предложен алгоритм расчета эффективных динамических свойств волокнистых композитов с вискеризованными волокнами, основанный на методе самосогласования Эшелби и методе комплексных модулей, на основании которого можно оценить эффективные характеристики вискеризованного слоя с учетом микро- и наноструктуры при использовании в качестве матрицы межфазного слоя вязкоупругого полимера, обеспечивающего повышение свойств демпфирования.

Доказана возможность использования упрощенных предельных соотношений типа Рейса для проведения экспресс оценок эффективных диссипативных характеристик вискеризованного слоя и модифицированного композита в целом, что обеспечивает эффективность проекторочных оценок.

Решены новые задачи механики деформируемого твердого тела для модифицированных композитов с вискеризованным межфазным слоем, которые имеют как теоретическое, так и практическое значение.

Автореферат даёт чёткое представление о диссертации и в полной мере отражает её содержание.

## ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность обосновывается использованием строгих положений теории упругости, механики композитов, а также апробированных методов осреднения и совпадением полученных результатов с экспериментальными данными, полученными другими авторами, приведенными в научной литературе.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Предложенный алгоритм можно использовать при проектировочных расчетах и для оптимизации вискеризованных композитных материалов, так как дает возможность учитывать все параметры неоднородного модифицированного волокнистого композита, включая базовое волокно, характеристики вискерсов и матрицы микро- и наноструктуры межфазного слоя, объемное содержание волокон с учетом параметров вискеризованного слоя.

## ЗАМЕЧАНИЯ О ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Диссертационная работа оформлена плохо. Многие ссылки на формулы расставлены неправильно, а также в работе есть много пустых мест вместо формул. Многие формулы и предложения написаны неправильно, а также многие научные термины используются некорректно. Все это очень затрудняет чтение работы. Род и число во многих местах применяются некорректно. Все обнаруженные замечания с целью сокращения письма выписывать не будем. Ниже укажем на некоторые из них.

- 1) Во введении в первом абзаце, начиная с шестой строки после точки до конца абзаца изложенный материал, точь-в-точь повторяется в начале второго абзаца с той разницей, что во втором абзаце в двух местах есть ссылки на источники. Кроме того, на 7-ой строке вместо слова «третьего» следует писать «третьей».
- 2) На странице 36-ой в тексте есть 8 пустых мест, а 3 в формулах (1.2) и (1.4).
- 3) На странице 37-ой есть 4 пустых мест в тексте, а 1 в формуле (1.6).
- 5) Обобщенный закон Гука соотношением (1.12) выписан с помощью компонент тензора модулей упругости с четырьмя индексами, а соотношениями — (1.14), (2.1) — (2.5), (Б.18), (В.1) и во многих других формулах эти компоненты применяются с двумя индексами и ничего не говорится о связи этих компонент.
- 6) На второй строке сверху на 68-ой странице написано «формула Вройнскиена» следует писать «Вронскиан».
- 7) На странице 73-ой есть в тексте в одной формуле два пустых места. Кроме того, первая формула из (2.130) написана неправильно.
- 8) На странице 75-ой соотношением (2.138) выписано характеристическое уравнение относительно «лямбда», но ничего не говорится о том, что такое «лямбда» и чье это характеристическое уравнение? Уравнение, характеристическим уравнением которого является уравнение (2.138) и которое следовало выписать, не выписано. Кроме того, на этой странице в тексте есть 10 пустых мест.
- 9) На странице 77-ой сверху на первой строке есть 1 пустое место, а также соотношением (2.151) выписано характеристическое уравнение и ничего не говорится о том, чье это характеристическое уравнение?
- 10) На странице 78 в тексте есть 5 пустых мест.
- 11) Глава 3 содержит всего 8 страниц, а выводы представлены на 3-х с лишним страницах. Чем это объясняется? Также глава 4 содержит 7 с лишним страниц. Наверно, следовало объединять эти главы.
- 12) На 107-ой странице в формулах (Б.27) есть 5 пустых мест.
- 13) На последней строке на 108-ой странице есть ссылка на источник [105], которого нет в списке литературы.



14) На 109-ой странице на 7-ой строке ссылки на формулы (1.11) и (1.2) неверны, а также на 11-ой строке сверху применяется словосочетание «граничное условие вектора перемещений», что некорректно. Следовало писать «кинематические граничные условия».

15) На 111-ой странице на предпоследней строке есть два пустых места.

Считаю, что плохое оформление диссертации и обнаруженные опечатки не снижают научной ценности и практической значимости результатов, полученных автором в диссертационной работе.

В целом, диссертационная работа **Маковского Сергея Владимировича** выполнена на хорошем научном уровне и является законченной квалификационной работой. По **актуальности, научной новизне, степени достоверности и практической значимости** диссертационная работа отвечает всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Маковский Сергей Владимирович** заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

Зам. зав. кафедрой механики композитов  
мех-мат ф-та МГУ имени М.В.Ломоносова  
доктор физико-математических наук, доцент

Подпись Никабадзе Михаила Ушангиевича заверяю:  
Декан механико-математического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова д.ф.-м.н.,  
член-корр. АН РФ, профессор



М.У. Никабадзе



А.И. Шафаревич

8.12.2020

Сведения об официальном оппоненте:

Полное имя: Никабадзе Михаил Ушангиевич  
Адрес места работы: 119991, Москва, ГСП-1,  
Ленинские горы, 1, механико-математический  
факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,  
кафедра механики композитов.

Раб. тел.: +7(495)9394343; <http://istina.msu.ru/profile/NikabadzeMU/>,  
[munikabadze@yandex.ru](mailto:munikabadze@yandex.ru), [nikabadze@mail.ru](mailto:nikabadze@mail.ru).

Шифр и наименование специальности, по которой защищены  
диссертации: 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».