

ТРАНСПОРТ

УДК 539.3

Л. П. Вовк, д-р техн. наук, Е. С. Кисель

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ТЕРМОУПРУГОГО АНАЛИЗА ПРОГРАММЫ ANSYS В ИССЛЕДОВАНИИ СПЕКТРОВ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ДЛЯ ТОНКИХ ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ ТЕЛ

Проведено численное исследование зависимости краевых и граничных динамических эффектов от геометрических и упругих параметров детали, представляющей собой тонкое тело; определение особенностей распределения термоупругих напряжений в зонах динамических эффектов на примере изотропного и анизотропного стержня.

Ключевые слова: термоупругая область, тонкое тело, стержень, анизотропия, локальная концентрация напряжений, напряженно-деформированное состояние, расчет на прочность, особые точки, сечения деталей, собственные частоты

Введение

В различных областях промышленности всегда остаются актуальными проблемы устойчивости и колебаний различных конструкций и их элементов. В частности таких, у которых один из размеров значительно меньше других, тонких оболочек, мембран, стержней, стержневых систем и т. д.

Подобная актуальность тонких тел, например, стержней и стержневых систем обусловлена очень широким их применением в различных областях техники, в частности в автомобилестроении, при изготовлении ферм, рам, балочных систем. Проблеме расчета тонкостенных стержневых рам посвящено значительное число работ в автомобильной отрасли, в частности, при разработке методов расчета несущей системы автотранспортного средства (АТС). Работы В. Н. Белокурова, М. Н. Закса, А. А. Иванова и др. посвящены исследованию напряженно-деформированного состояния узлов тонкостенных рамы. Большое внимание уделяется совершенствованию пространственных расчетных схем автомобильной рамы. С этой целью проводятся исследования по применению в модели рамы однотипных конечно-элементных и комбинированных систем, состоящих из различных элементов. Исследования подтвердили большие возможности метода конечных элементов и метода спектральных элементов.

Для стабильной и надежной работы автомобильных деталей, все чаще применяют не только изотропные, но и материалы с различной степенью анизотропии. Следует отметить, что основными элементами большинства приборов являются стержни, которые могут иметь очень сложную геометрию осевой линии находиться под влиянием различных нагрузок, в том числе температурных. Именно температурная нагрузка в тонких конструкциях автомобилестроения, в частности деформация под действием термических напряжений, является особенно актуальной задачей.

Вопросам и исследованиям механических характеристик рассматриваемых тел в механике деформируемого твердого тела (МДТТ) посвящено достаточно много работ, в т. ч. [1–6]. Задачи статики и динамики пространственных, пространственно-криволинейных стержней частично рассмотрены в отдельных монографиях и в периодической литературе. К настоящему времени опубликовано значительное число работ, посвященных теории, методам расчета и проектирования стержней и пластин из анизотропных материалов, в частности различных композитов [5–6]. Материалы подобного рода обладают высокой удельной проч-

ностью и жесткостью, а потому находят в настоящее время широкое применение в различных областях техники. Значительное внимание уделено сплошным и полым тонкостенным композитным упругим телам [3]. Но практически неосвещенными остаются вопросы термоупругости в тонких анизотропных телах. Следует отметить, что большая часть расчетов подобного рода выполнялась лишь в изотропном приближении [1–2].

Проблема заключается в сложности и объемности решения связанных задач данного класса даже при использовании ЭВМ. Однако существующие на данный момент достаточно мощные программные пакеты предоставляют широкий спектр возможностей, позволяя эффективно использовать существующие методики решения задач МДТТ тонких тел, поскольку именно наличие малых геометрических параметров позволяет эффективно использовать при таком расчете программные методы.

Цель работы

Поскольку модели из «тонких» элементов создаются, как правило, с использованием стержневых и пластинчатых конечных элементов, целью настоящей работы стало численное исследование и сравнительный анализ полученных спектров собственных частот и соответствующих им форм для тонких изотропных и анизотропных элементов, в частности при наличии общей анизотропии тепловых и упругих свойств материала.

Для проведения подобного рода анализа наиболее приемлемым является метод конечных элементов, широко используемый в современных программных пакетах анализа элементов конструкций, таких как ANSYS, COSMOS/Design, STAR LS Dyna и т. д. Реализованный авторами расчетный подход выполнен в программном комплексе ANSYS, представляющем собой одно из наиболее эффективных средств для решения связанных задач термоупругости и исследования НДС конструкций различного рода, в том числе и тонких.

Также следует отметить, что средства термоупругого анализа программы ANSYS позволяют использовать результаты решения задачи теплообмена для проведения прочностного анализа [7–8]. Такая возможность удобна при определении влияния температурного поля на прочность конструкции. Пользователь может задать значения тепловой нагрузки отдельно или в совокупности со значениями механических нагрузок. В данном программном комплексе доступны два способа связывания теплового и прочностного анализов.

Первый состоит в том, что эти два анализа проводятся друг за другом. Сначала получают температурное поле в модели для заданных граничных условий теплообмена. Значения температур затем используются в виде нагрузок на стадиях предпроцессорной подготовки и получения решения при последующем структурном анализе.

Второй способ предусматривает проведение совместного термоупругого решения. В программе ANSYS это достигается использованием комбинированных конечных элементов, которые имеют как тепловые, так и деформационные степени свободы. Из этих элементов создается расчетная модель и задаются тепловые и механические граничные условия. На каждой итерации выполняется решение тепловой и упругой задач с использованием значений температур и перемещений, полученных на предыдущей итерации. Имеется возможность вводить в расчетную модель контактные элементы общего типа. Эти элементы допускают теплопередачу через поверхность контакта. Как только контактные поверхности смыкаются, становится возможным процесс теплообмена.

С помощью процедуры совместного решения возможно объединение таких сложных задач теплообмена и расчета на прочность, как нестационарный тепловой и нелинейный динамический анализы. В предлагаемой работе авторами был проведен связанный термоупругий расчет с использованием программного комплекса ANSYS первым, последовательным способом.

Как известно, под воздействием нагрузки, в том числе и тепловой, происходит изменение параметров колебаний системы, в связи с чем возникает вопрос о степени влияния

термоупругих параметров различных материалов на спектр собственных частот и необходимости дальнейшего учета данного факта в инженерных конструкционных расчетах.

Основные материалы исследования

В качестве модели рассматривается плоская деформация двумерной области длиной $L = 2,46$ м и малой, в сравнении с L , высотой h , изменяющейся в пределах $h/2 \in [0,0125; 0,0925]$ м. Термомеханические свойства изотропного и анизотропного (ортотропного) материалов модели определяются константами:

1) для изотропного материала:

$\rho = 3000 \text{ кг/м}^3$ – плотность, $E = 5 \cdot 10^9 \text{ Па}$ – модуль Юнга, $\nu = 0,1$ – коэффициент Пуассона, $\alpha_t = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ – коэффициент линейного теплового расширения, $\lambda_0 = 25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ – коэффициент теплопроводности, $C = 480 \text{ Дж/К}$ – теплоемкость;

2) для ортотропного материала:

$\rho = 3000 \text{ кг/м}^3$ – плотность, $E_X = 5 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $E_Y = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $E_Z = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ – соответствующие модули Юнга, $\nu = 0,1$, $\nu = 0,15$, $\nu = 0,0075$ – коэффициенты Пуассона, $\alpha_{X_t} = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\alpha_{Y_t} = 8,2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\alpha_{Z_t} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ – коэффициенты линейного теплового расширения, $\lambda_0 = 25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_0 = 15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_0 = 20 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ – коэффициенты теплопроводности, $C = 480 \text{ Дж/К}$ – теплоемкость.

Для моделей 1 и 2 в программном комплексе ANSYS был проведен модальный анализ для изотропной и ортотропной моделей с учетом и без учета термоупругости материала, как преднапряженного состояния области.

Результатом данного расчета стало вычисление значений первых семнадцати собственных частот и построение зависимостей спектров собственных частот от высоты стержня (рисунки 1–4). Также была проведена визуализация отдельных, соответствующих им форм распределения упругих и термоупругих напряжений σ_{xx} по длине сечения, а также форм, соответствующих общему вектору перемещений, что позволило судить о степени влияния анизотропии и термоупругости на спектр резонансных частот, деформации рассмотренной области и участках локализации максимальных значений напряжений.

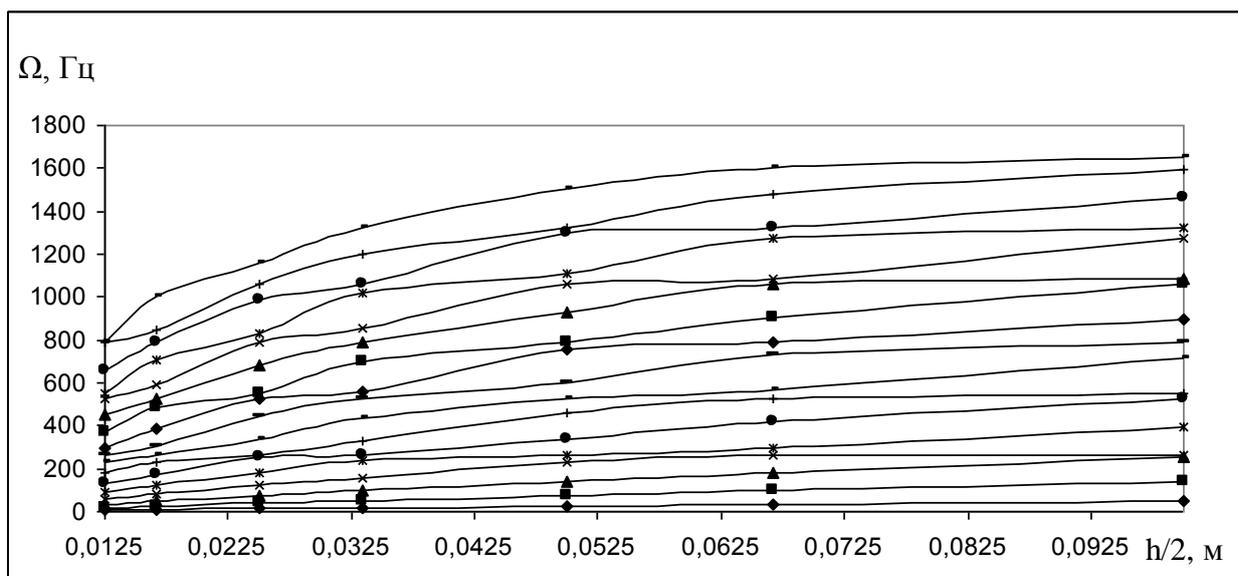


Рисунок 1 – Зависимость спектра собственных частот от высоты стержня, упругая изотропная модель

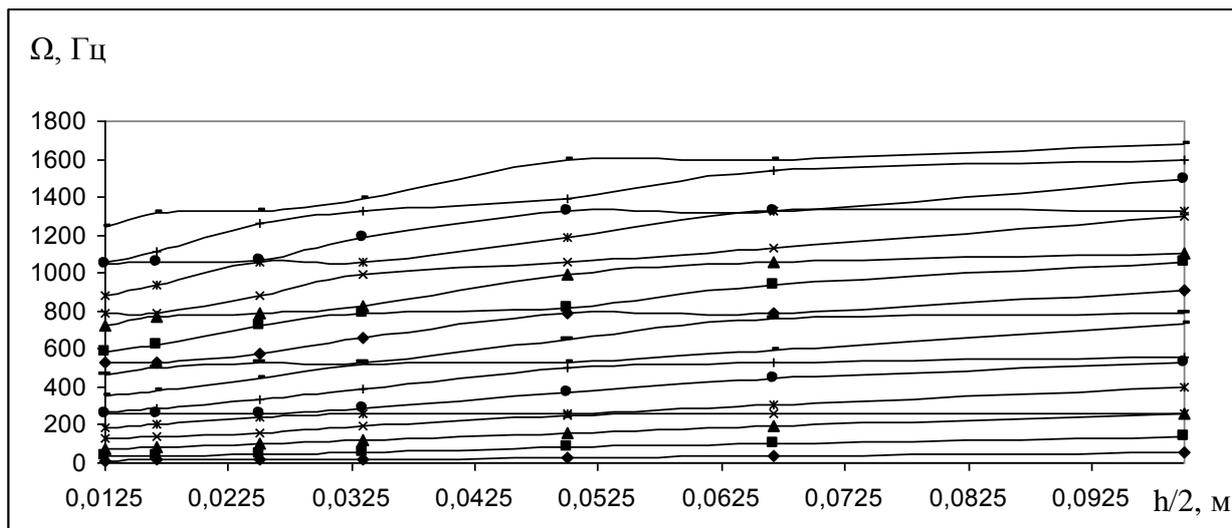


Рисунок 2 – Зависимость спектра собственных частот от высоты стержня, термоупругая изотропная модель

Анализируя данные рисунков 1–2, можно сделать следующие выводы о влиянии термоупругости на спектр собственных частот изотропного стержня:

1. Термоупругость определяет более выраженный краевой эффект на спектре (рисунок 2).
2. Наличие краевого резонанса на нескольких частотах термоупругого спектра и лишь одной подобной частоты в упругом спектре частот.
3. Увеличение высоты стержня способствует увеличению значений частот и в упругом и в термоупругом случаях (рисунок 1–2).

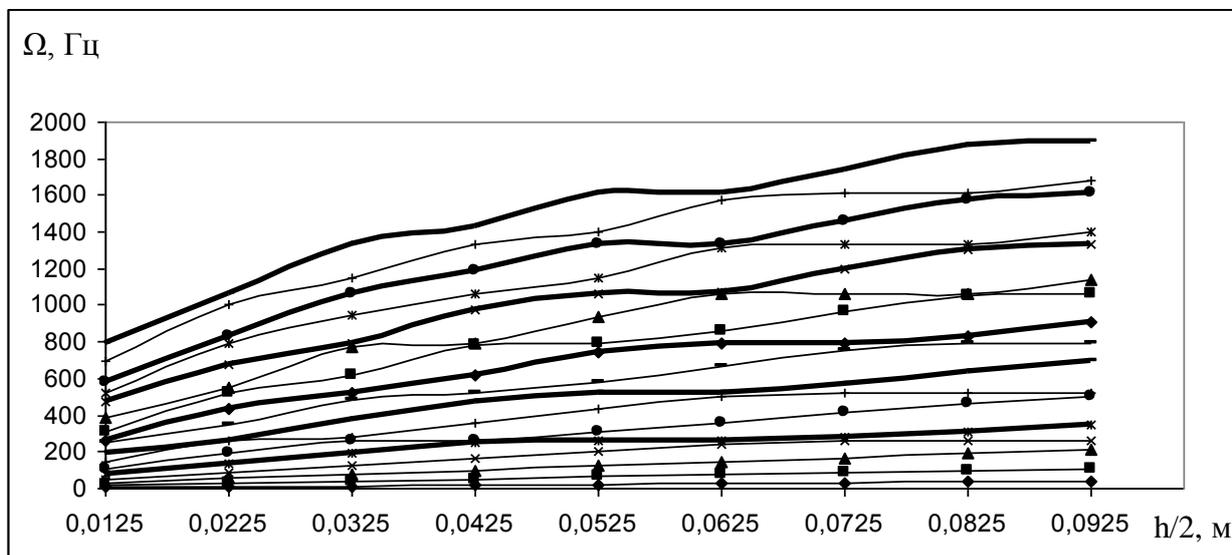


Рисунок 3 – Зависимость спектра собственных частот от высоты стержня, упругая ортотропная модель

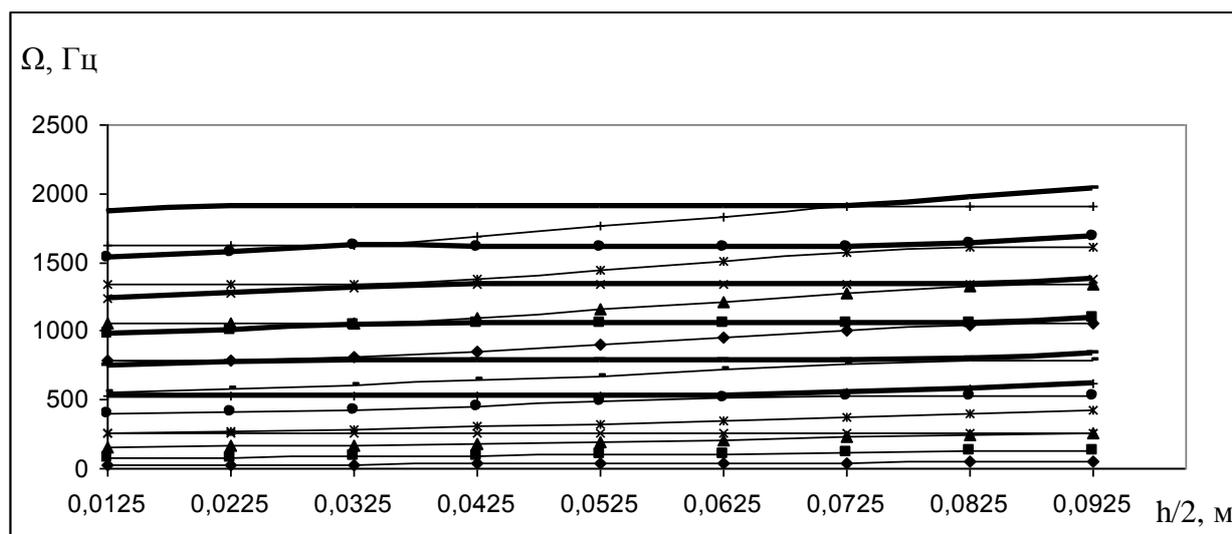


Рисунок 4 – Зависимость спектра собственных частот от высоты стержня, термоупругая ортотропная модель

О влиянии упругой и термоупругой анизотропии на спектры можно судить по рисункам 3–4:

1. В случае упругой анизотропии (рисунок 3) диапазон изменения значений собственных частот значительно шире, чем в термоупругой (рисунок 4), где он фактически остается постоянным, в зависимости от h .

2. Протяженность участков «плато» в изотропном упругом случае (рисунок 1) значительно меньше, чем в ортотропном упругом (рисунок 3).

3. В упруго-анизотропном спектре (рисунок 3) наблюдается несколько частот краевого резонанса (№ 5, 8, 10, 13, 15), довольно слабо выраженных (рисунок 4).

4. Изменение высоты области незначительно влияет на рассматриваемый диапазон частот термоупругого анизотропного стержня (рисунок 4).

5. В случае термоупругой анизотропии частоты и признаки краевого резонанса только угадываются. Термоупругость в анизотропных телах резко снижает интенсивность локального эффекта.

Выводы

Таким образом, можно говорить о некотором «стабилизирующем» влиянии анизотропии материала на проявление краевых эффектов, которое еще более усиливает температурный фактор, что способствует менее ярко выраженным участкам «плато». Термоанизотропия также уменьшает общее количество резонансных частот и способствует более медленному росту их значений при изменении высоты стержня.

Перспективным направлением дальнейших исследований может стать углубление исследований путем проведения соответствующего спектрального анализа, а также рассмотрение областей более сложной формы и геометрии, в частности, трехмерных термоупругих анизотропных сечений автомобильных деталей, а также рассмотрение широко используемой в автомобилестроении математической модели, позволяющей учитывать особенности соединения стержней с оболочкой.

Список литературы

1. Квасов, И. Е. Расчет волновых процессов в неоднородных пространственных конструкциях / И. Е. Квасов, И. Б. Петров, Ф. Б. Челноков // Математическое моделирование. – 2009. – Т. 21, № 5. – С. 3–9.
2. Ломазов, В. А. Учет термочувствительности в задаче диагностики термоупругих сред / В. А. Ломазов, Ю. В. Немировский // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44, № 1. – С. 176–184.
3. Кравчук, А. С. Об определении линейных и нелинейных свойств неоднородных материалов / А. С. Кравчук // Математическое моделирование систем и процессов. – Пермь : Пермский государственный технический университет, 2001. – № 9. – С. 67–77.
4. Колесник, С. А. Сопряженный теплообмен на границах композиционных анизотропных материалов / С. А. Колесник, Е. Л. Кузнецова, В. Ф. Формалев // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 232–240.
5. Кочемасова, Е. И. Матрица жесткости отсека анизотропной цилиндрической оболочки с произвольным контуром поперечного сечения / Е. И. Кочемасова, Н. П. Тютюнников, Ф. Н. Шклярчук // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – № 5. – С. 723–732.
6. Денисюк, И. Т. Эффект связности тепловых и упругих полей вблизи особой линии распространяющейся полости / И. Т. Денисюк // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2004. – № 3. – С. 45–52.
7. Леонтьев, Н. В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа / Н. В. Леонтьев. – Н. Новгород, 2006.
8. Иванов, В. Н. Словарь-справочник по литейному производству / В. Н. Иванов. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
9. Солнцев, Ю. П. Материаловедение : учеб. для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, Ф. Войткун. – М. : МИСИС, 1999. – 600 с.

Л. П. Вовк, Е. С. Кисель

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

Использование средств термоупругого анализа программы ANSYS

в исследовании спектров собственных частот для тонких изотропных и анизотропных тел

Целью настоящей работы стало численное исследование и сравнительный анализ полученных спектров собственных частот и соответствующих им форм для тонких изотропных и анизотропных элементов, в частности при наличии общей анизотропии тепловых и упругих свойств материала. Как известно, под воздействием нагрузки, в том числе и тепловой, происходит изменение параметров колебаний системы, в связи с чем возникает вопрос о степени влияния термоупругих параметров различных материалов на спектр собственных частот и необходимости дальнейшего учета данного факта в инженерных конструкционных расчетах. Для моделей двух различных моделей, отображающих специфику исследования, в программном комплексе ANSYS был проведен модальный анализ для изотропной и ортотропной моделей с учетом и без учета термоупругости материала, как преднапряженного состояния области. Можно говорить о некоем «стабилизирующем» влиянии анизотропии материала на проявление краевых эффектов, которое еще более усиливает температурный фактор, что способствует менее ярко выраженным участкам «плато». Термоанизотропия также уменьшает общее количество резонансных частот и способствует более медленному росту их значений при изменении высоты стержня.

ТЕРМОУПРУГАЯ ОБЛАСТЬ, ТОНКОЕ ТЕЛО, СТЕРЖЕНЬ, АНИЗОТРОПИЯ, ЛОКАЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ, ОСОБЫЕ ТОЧКИ, СЕЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ, СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ

L. P. Vovk, E. S. Kisel
Automobile and Highway Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka
Application of the Thermoelastic Analysis Means of the ANSYS Program in the Eigenfrequency Spectrum Study for Slender Isotropic and Anisotropic Bodies

The aim of this work is the numerical investigation and comparative analysis of obtained eigenfrequency spectrum and appropriate forms for slender isotropic and anisotropic bodies particularly at general anisotropy of material thermal and elastic properties. As known, under load, including thermal load there is parameters change of the system vibrations. In this connection, the question arises about the level of thermoelastic parameters impact of various materials on the eigenfrequency spectrum and about necessity of taking into account this fact in the engineering constructional calculations. To model two various models represented the study specific character in the software package ANSYS the modal analysis for isotropic and orthotropic models was carried out with and without material thermoelasticity as an area prestressed state. We can say about certain «stabilizing» impact of the material anisotropy on the edge effects display. It enhances temperature factor that leads to less expressed plateau regions. Thermoanisotropy reduces also total amount of resonance frequencies and leads to slower growth of their values at the rod height change.

THERMOELASTIC AREA, SLENDER BODY, ROD, ANISOTROPY, STRESS LOCAL CONCENTRATION, DEFLECTED MODE, STRENGTH CALCULATION, SINGULAR POINTS, PART SECTION, EIGENFREQUENCIES

Сведения об авторах:

Л. П. Вовк

SPIN-код: 9860-6682
 Телефон: +38 (095) 382-58-93
 Эл. почта: lv777@list.ru

Е. С. Кисель

SPIN-код: 7676-8943
 Телефон: +38 (093) 136-72-36
 Эл. почта: e.s.kisel@gmail.com

Статья поступила 09.12.2016

© Л. П. Вовк, Е. С. Кисель, 2017

Рецензент: Е. П. Мельникова, д-р техн. наук, проф. АД ИГОУВПО «ДонНТУ»