

УДК 621.81

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Кочеткова Мария Владимировна,

Пензенский государственный университет, г. Пенза,

соискатель ученой степени кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Кочетков Денис Викторович,

Пензенский государственный университет, г. Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Кузнецов Никита Сергеевич,

лингвистическая гимназия №6, г. Пенза,

гимназист.

Смогунов Владимир Васильевич,

Пензенский государственный университет, г. Пенза,

доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Шорин Владимир Алексеевич,

Пензенский государственный университет, г. Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Банных Андрей Григорьевич,

Пензенский государственный университет, г. Пенза,

соискатель ученой степени кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Аннотация

Статья посвящена изложению результатов моделирования гетероструктур. В рамках САЕ-программы CosmosWorks создана твердотельная модель резьбового соединения. Дана оценка напряженно-деформированного

состояния крепежных резьбовых соединений с метрической резьбой при растяжении. Приведены результаты моделирования тепловых полей и градиентов температур по впадине первого витка. Предложена новая технология антифреттинговой наномодификации витков и опорных поверхностей ультрадисперсным углеродом.

Ключевые слова: гетероструктуры, модели, концентрация напряжений, напряженно-деформированное состояние, антифреттинговая наномодификация.

MODELING OF COMPLEX SYSTEMS HETEROSTRUCTURES

Kochetkova Maria Viadimirovna,

Penza State University, Penza,

Post-graduate student of the department "Theoretical and applied mechanics and graphics".

Kochetkov Denis Viktorovich,

Penza State University, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Theoretical and applied mechanics and graphics".

Kuznetsov Nikita Sergeevich,

Linguistic Gymnasium №6, Penza,

Schoolboy.

Smogunov Vladimir Vasilevich,

Penza State University, Penza,

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department "Theoretical and applied mechanics and graphics".

Shorin Vladimir Alekseevich,

Penza State University, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Theoretical and applied mechanics and graphics".

Bannyh Andrey Grigorevich,

Penza State University, Penza,

Post-graduate student of the department "Theoretical and applied mechanics and graphics".

Abstract

The article is devoted to the presentation of the simulation results of heterostructures. As part of the CAE program Cosmos Works. Created a solid model of a threaded joint. The estimation of the stress-strain state of the fastening screw connections with metric thread in tension. The results of modeling of thermal fields and temperature gradients on the cavity of the first round. The new technology antifrettingovoy nanomodifikatsii turns and ultrafine carbon-bearing surfaces.

Keywords: heterostructure, models, stress concentration, stress-strain state, antifrettingovaya nanomodifikatsiya.

Введение. Интеллектуальный анализ информации об отказах сложных технических систем в строительной индустрии, проведенный авторами настоящей статьи, показал, что в подавляющем большинстве случаев внезапные и постепенные отказы изделий металлургии, приборо-, машиностроения обусловлены отказами гетероструктур [1].

Отказы неразъемных гетероструктур, выполненных по технологиям сварки, пайки, напыления, склеивания, заливки, опрессовки и т.п. в основном связаны с субмикротрещинообразованием по границам раздела разнородных материалов.

Отказы разъемных гетероструктур – контактных, с натягом, шпоночных, резьбовых и т.п. в более чем 50% случаев связаны с фреттинг-износом контактирующих поверхностей. На рисунке 1 приведены типовые этапы фреттинг-износа.

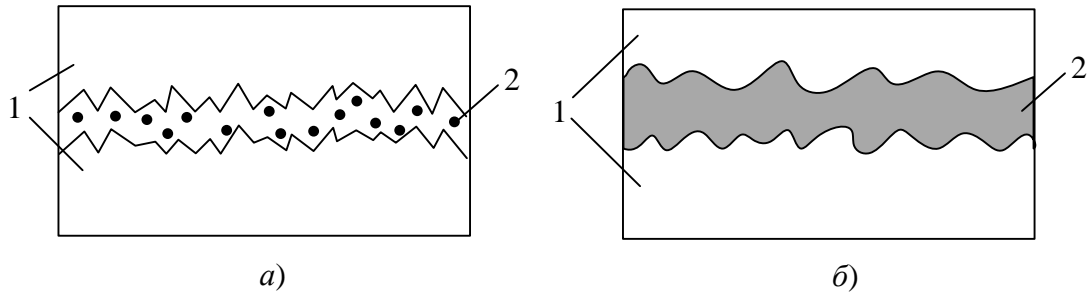


Рисунок 1 – Типовые этапы фреттинг-износа:

- а) начальный этап: 1 – материал контактных систем, 2 – продукты износа,
 б) конечный этап с полным заполнением зазора между поверхностями.

Повреждения от фреттинг-износа ведут к нарушениям размерной точности, изменению микро- и макрогеометрии контактирующих поверхностей, а также к понижению качества функциональных параметров гетероструктур.

Для начала процесса фреттинга достаточно очень малой амплитуды скольжения ($8 \cdot 10^{-7}$ мм). При увеличении амплитуды относительного скольжения поверхностей в местах контакта, процессы, которые при этом развиваются, становятся обычным фреттинг-износом.

Величина износа при фреттинге напрямую зависит от давления.

1. Обобщенные модели гетероструктур. Основные задачи анализа разрушений при эксплуатации, перевозке и хранении техники, могут быть сведены к пространственной задаче определения напряженно-деформированного состояния соединений сложных гетероструктур под действием неоднородного температурного поля. Алгоритм моделирования напряженно-деформированного состояния осесимметричных гетероструктур строится на решении уравнений Ламе

$$\begin{aligned}
 (\lambda + 2G) \frac{\partial e}{\partial r} - 2G \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \omega_z}{\partial \Theta} - \frac{\partial \omega_\theta}{\partial z} \right) - (3\lambda + 2G) \alpha \frac{\partial T}{\partial r} &= 0, \\
 (\lambda + 2G) \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial e}{\partial \Theta} - 2G \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial z} - \frac{\partial \omega_r}{\partial r} \right) - (3\lambda + 2G) \frac{\alpha}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \Theta} &= 0, \\
 (\lambda + 2G) \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2G}{r} \left(\frac{\partial \omega_\theta}{\partial r} - \frac{\partial \omega_r}{\partial \Theta} \right) - (3\lambda + 2G) \alpha \frac{\partial T}{\partial z} &= 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Объемная информация e и компоненты вращения $\omega_r, \omega_\theta, \omega_z$, выражаются через компоненты смещения U, \mathcal{G}, ω следующим образом:

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(rU)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \Theta} + \frac{\partial \omega}{\partial z}; \\
 \omega_r &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \Theta} - \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} \right); \\
 \omega_\theta &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial \omega}{\partial r} \right); \\
 \omega_z &= \frac{1}{2} r \left(\frac{\partial(r\mathcal{G})}{\partial r} - \frac{\partial U}{\partial \Theta} \right);
 \end{aligned} \tag{2}$$

где α – КЛТР, λ, G – постоянные Ламе.

Краевые условия:

$$\sigma_{zz} = 0; \tau_{rz} = 0; \tau_{\theta z} = 0 \text{ – на плоскости ; } z = 0$$

$\sigma_{rr(1)} = \sigma_{rr(3)}; \tau_{rz(1)} = \tau_{rz(3)}; \tau_{r\theta(1)} = \tau_{r\theta(3)}; U_1 = U_3; \mathcal{G}_1 = \mathcal{G}_3; \omega_1 = \omega_3$ – на поверхности раздела;

$\sigma_{rr(1)} = \sigma_{rr(2)}; \tau_{rz(1)} = \tau_{rz(2)}; \tau_{r\theta(1)} = \tau_{r\theta(2)}; U_1 = U_2; \mathcal{G}_1 = \mathcal{G}_2; \omega_1 = \omega_2$ – на поверхности раздела;

$$\sigma_{zz} = 0; \tau_{rz} = 0; \tau_{\theta z} = 0 \text{ – на поверхности цилиндра;}$$

$$\omega = 0; \tau_{rz} = 0; \tau_{\theta z} = 0 \text{ – на плоскости симметрии по } z,$$

$$U = 0; \mathcal{G} = 0 \text{ – на оси } Oz,$$

$U_2 = U_3; \mathcal{G}_2 = \mathcal{G}_3$ – на криволинейной поверхности $\omega_2 = \omega_3; \sigma_{ij(2)} \mathcal{G}_j = \sigma_{ij(3)} \mathcal{G}_j$ сопряжения.

При выражении напряжений в граничных условиях через перемещения с помощью физических и геометрических уравнений получается замкнутая система дифференциальных уравнений. Аналогично записывается система для плоских гетероструктур.

Наиболее эффективным методом решения такого рода систем является полуаналитический метод конечных элементов, позволяющий разделить исходную задачу на совокупность более простых, сводящихся к системам алгебраических уравнений.

Разделение осуществляется путем разложения искомым функций и нагрузок по окружной координате в ряды Фурье. Для каждой из гармоник решение сводится к системе алгебраических уравнений вида

$$[K^{LL}]\{\delta^L\} = \{F^L\}, \quad (3)$$

где $[K^{LL}]$ – матрица жесткости для системы конечных элементов,
 $\{\delta^L\}$ – столбец узловых неизвестных,
 $\{F^L\}$ – столбец узловых температурных сил.

Матрица жесткости для каждого элемента l имеет вид

$$[K^{LL}] = \begin{bmatrix} [K_{ii}^{LL}] & [K_{ij}^{LL}] & [K_{ik}^{LL}] \\ [K_{ji}^{LL}] & [K_{jj}^{LL}] & [K_{jk}^{LL}] \\ [K_{ki}^{LL}] & [K_{kj}^{LL}] & [K_{kk}^{LL}] \end{bmatrix} \quad (4)$$

где подматрицы $[K_{ij}^{LL}]$ размерности 3×3 строятся следующим образом:

$$[K_{ij}^{LL}] = \iiint_g [B_i^L]^T [D] [B_j^L] r dr dz d\varphi, \quad (5)$$

где $[B_i^L]$ – матрица упругих деформаций для узла

$$[B_i^L] = [\bar{B}_i]^L \sin L\Theta + [\bar{B}_i]^{LL} \cos L\Theta; \quad (6)$$

$[D]$ – матрица упругости для элемента l , с учетом свойства ортогональности

$$[K_{ij}^{LL}] = \pi \left\{ [\bar{K}_{ij}^{LL}] + [\bar{K}_{ij}^{LL}] \right\}. \quad (7)$$

Функция распределения температур $T(r, z, \Theta)$ представляется также в виде ряда Фурье

$$T(r, z, \Theta) = T_0 + \sum_{L=1}^l \left\{ \bar{T}(r, z) \sin L\Theta + \bar{T}(r, z) \cos L\Theta \right\} \quad (8)$$

Матрица начальных температурных деформаций имеет вид

$$\{\varepsilon_0\} = \sum_{L=1}^l \left\{ \{\bar{\varepsilon}_0\} \sin L\Theta + \{\bar{\varepsilon}_0\} \cos L\Theta \right\} \quad (9)$$

Узловые силы от действия начальных температурных деформаций для элемента l равны

$$\{F^L\}_r = \iiint_g [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} d\vartheta = -\pi \left\{ [\bar{F}_i^L] + [\bar{F}_i^L] \right\} \quad (10)$$

Формирование матриц жесткости и узловых температурных сил для системы элементов осуществляется стандартным образом.

Таким образом, для каждой из L гармоник определяются матрицы $[K^{LL}]$ и $[F^L]$ системы (3), из которых определяются L – компоненты вектора перемещений, после чего по соотношениям для деформаций и напряжений теории упругости определяется напряженно-деформированное состояние каждого элемента, полученные решения суммируются для каждой гармоники, и, таким образом, решается задача для всей гетероструктуры в целом.

Отметим, что при интегрировании (5, 10) использовался метод приближенного интегрирования, проверенный на тестовых задачах и показавший хорошие результаты по точности.

В случае однородного температурного поля, рассмотренный алгоритм упрощается, в (8) остается постоянное слагаемое T_0 , и система (3) решается только для нулевой гармоники. При решении плоских задач напряженного или деформированного состояний количество неизвестных перемещений уменьшается до двух, а компонент деформаций и напряжений – до трех.

Исследование полей напряжений в гетероструктурах осесимметричного и плоского типа с учетом реальных геометрических и прочих параметров проводились в постановке осесимметричного или плоского деформированного состояния при предполагаемом известном распределении температуры в объеме гетероструктуры.

Вычислялись безразмерные параметры напряжений:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_i &= \frac{\sigma_i}{E\alpha|\Delta T|}; \\ \bar{\sigma}_z &= \frac{\sigma_z}{E\alpha|\Delta T|}.\end{aligned}\tag{11}$$

На рисунке 2 приведены поля напряжений – линии равных интенсивностей напряжений в гетероструктуре в диапазоне температур минус 60...70°С.

Из проведенных исследований осесимметричных и плоских полей напряжений в гетероструктурах отчетливо прослеживается закономерность весьма существенной зависимости интенсивности напряжений от геометрии сопряжений.

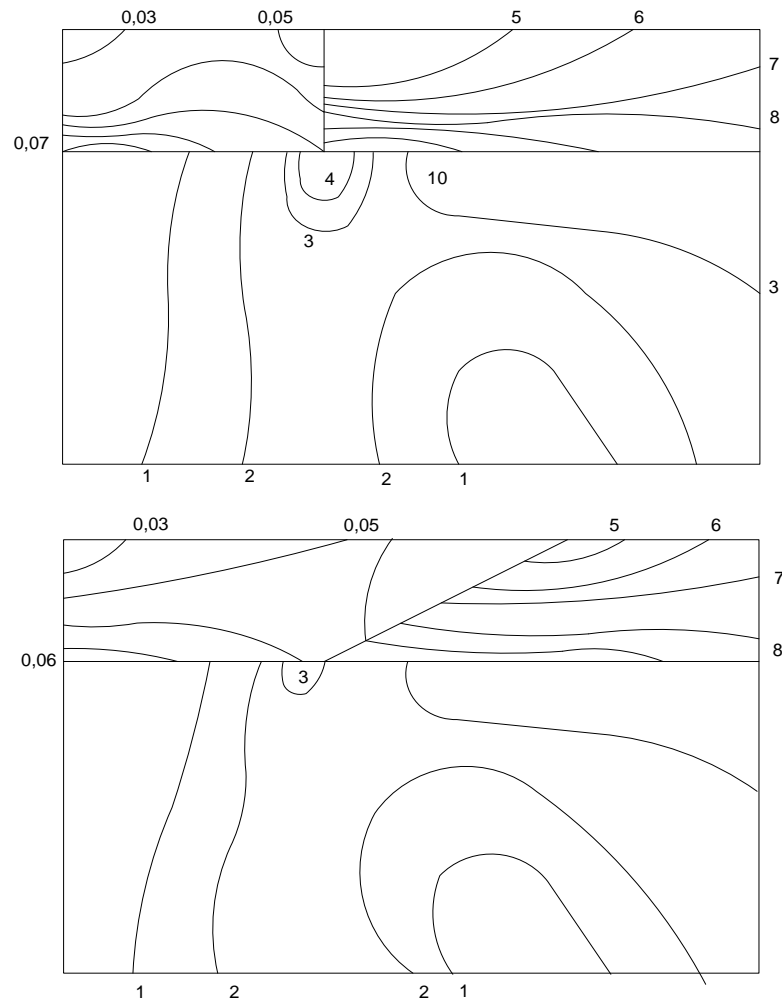


Рисунок 2 – Поля напряжений

Математическое моделирование концентрации термических напряжений в осесимметричных и плоских гетероструктурах показывает, что в угловых точках гетероструктур имеет место концентрация термических напряжений, величина которой зависит как от тепловых полей, так и от геометрии гетероструктуры.

2. Твердотельная модель резьбовых соединений.

Рассматривается случай статического приложения нагрузки, т.е. решается задача линейного статического анализа. Статический анализ начинается с создания твердотельной модели (сборки) резьбового соединения, для чего применяется САД программа SolidWorks. Рассмотрим конкретный пример резьбового соединения M10×1,25 6H/6g. Не удалось осуществить сборку резьбового соединения образованного винтовыми поверхностями. Поэтому, с учетом достаточно малого угла подъема винтовой линии, предложено резьбу заменить массивом колец с сечением, эквивалентными профилю резьбы. Эта аппроксимация, как известно, незначительно влияет на прочность и еще меньше на жесткость [1].

Согласно принципу Сен-Венана, для исключения влияния закрепления и уменьшения объема вычислений, обрезаем болт на расстоянии одного диаметра от торцов гайки, и уменьшаем расчетную модель, чтобы обеспечить минимальное число конечных элементов в осевом направлении. Также, для уменьшения объема вычислений выделяется одна шестая часть болтового соединения в качестве расчетной модели (рисунок 3). Это оказывается возможным благодаря симметрии соединения. Следует выбирать угловой размер сектора достаточно малым, чтобы обеспечить минимальное число конечных элементов в окружном направлении. В то же время, чем он меньше, тем больше степень вырождения элементов, примыкающих к оси и тем ниже вычислительная устойчивость процедуры решения.

Используя, библиотечные файлы cosmosmaterials и solidworksmaterials выбирается материал резьбового соединения. Кроме того, материал может быть определен (внесен) пользователем с необходимыми свойствами, выбранными по справочным данным. Принимаем, в соответствии с классом прочности болта – 10.9: материал для болта сталь 40X, для гайки сталь 35X [2].

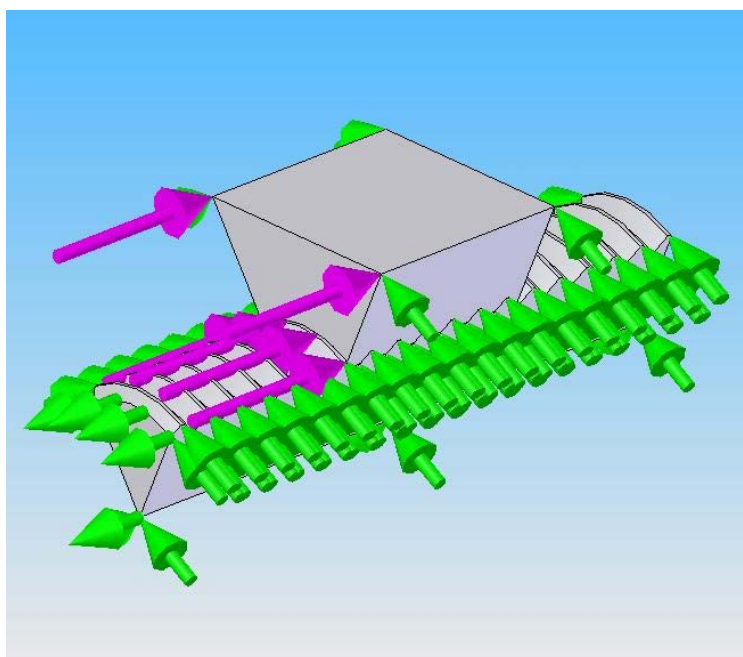


Рисунок 3 – Расчетная модель резьбового соединения

COSMOSWorks поддерживает разнообразные типы граничных условий. От других конечно-элементных программ COSMOSWorks отличается тем, что граничные условия могут задаваться исключительно в привязке к объектам геометрии. Кроме того, нагрузки и граничные условия могут быть приложены в глобальной или локальной системе координат. В данной задаче были использованы следующие граничные условия:

- на плоскостях, по которым выделялась одна шестая часть болта, назначалось условие «симметрия», при котором отсутствует перемещение в направлении нормали к ним, т.е. нормальные перемещения на плоскостях, проходящих через ось симметрии, равны нулю;
- на левом торце болта задавались ограничения в виде отсутствия перемещения вдоль оси соединения;
- на левом торце гайки прикладывалась нормальная сила $P = 1000\text{Н}$, чтобы резьбовое соединение работало на растяжение;
- в зоне контакта резьбовых поверхностей применялись граничные условия в виде «нет проникновения, узел к узлу». Данные условия имитируют контактное взаимодействие цилиндрических поверхностей без учета сил трения и без изменения площади контакта в процессе нагружения.

Особо необходимо отметить инструменты генерации конечно-элементной сетки. Пользователь может определять параметры дискретизации – средний размер конечного элемента и, при необходимости, области с более мелкой сеткой, используя параметр управление сеткой. Для решения поставленной задачи введены элементы управления, позволяющие уплотнить сетку вблизи впадин резьбы, а именно на первом витке резьбы. Следует помнить о влиянии величины основной сетки (A), управления сеткой (Δ) и количества слоев сетки (r) на достоверность результата. В связи с этим были проведены исследования влияния размера управляющей сетки и количества ее слоев на точность исследования концентрации напряжения во впадине первого витка болта. График зависимости эквивалентных напряжений по Мизесу (σ_i) от размера управляющей сетки (Δ) представлен на рисунке 4, основной размер сетки $A=0,8\text{мм}$.

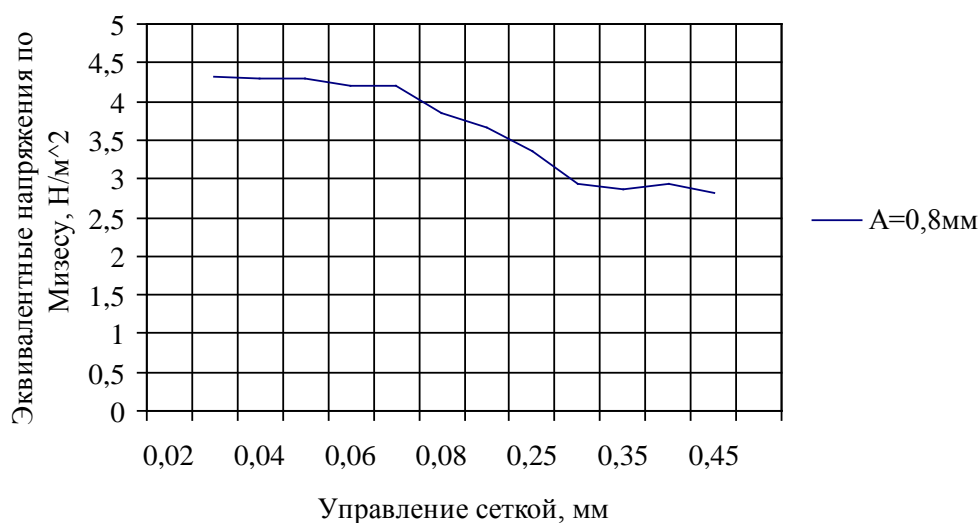


Рисунок 4 – График зависимости эквивалентных напряжений по Мизесу (σ_i) от размера управляющей сетки (Δ)

Из графика видно, что начиная с $\Delta=0,06\text{мм}$ не наблюдается зависимости результата от размера управляющей сетки, т.е расчет с учетом концентрации напряжения необходимо проводить при $\Delta \leq 0,06\text{мм}$.

Результаты анализа конструкции можно увидеть в виде трехмерной графики и получить информацию о напряжениях, деформации, перемещениях.

Отчеты по результатам анализа генерируются автоматически в виде странички HTML.

3. Тепловая модель резьбовых соединений. COSMOSWorks позволяет решать стационарные и нестационарные задачи теплопроводности в линейной и нелинейной постановке.

Рассмотрим задачу теплопроводности, т. е движение тепла только через контактные поверхности между гайкой и болтом на конкретном примере резьбового соединения M10×1,25-6H/6g (рисунок 5). Пусть головка болта нагревается от какого-то источника тепла до 20°C, а гайка и выступающая часть болта – нагревается до 100°C (рисунок 6). В зоне контакта резьбовых поверхностей применяем граничные условия в виде «связанные», данные условия имитируют отсутствие термосопротивления. На поверхностях, которые не находятся в контакте задаем «тепловое сопротивление, поверхность с поверхностью» равное 10000K/W, данные условия имитируют отсутствие теплообмена между не сопрягаемыми поверхностями в резьбовом соединении. На остальных поверхностях назначаем условие «изолированный», оно имитирует отсутствие теплообмена между окружающей средой и рассматриваемым соединением. Принимаем, в соответствии с классом прочности болта – 10.9: материал для болта сталь 40X, для гайки сталь 35X [2].

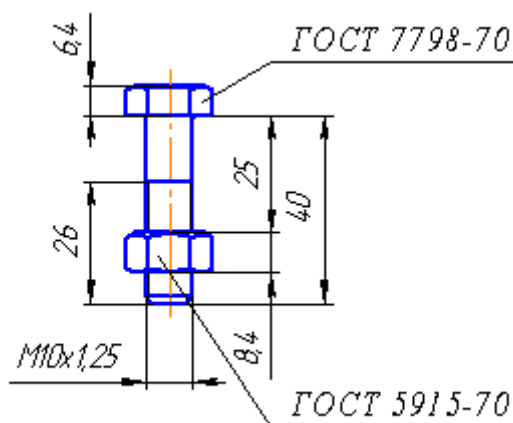


Рисунок 5 – Размеры резьбового соединения

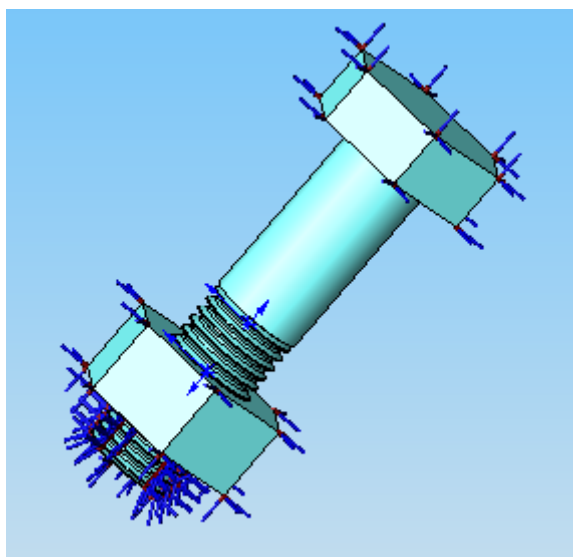


Рисунок 6 – Расчетная схема теплового анализа резьбового соединения

Далее запускаем программу на выполнение теплового расчета. По результатам расчета можно построить поле температур (рисунок 7) и «зондированием» определить температуру в любом интересующем месте резьбового соединения, как на поверхности, так и по глубине деталей.

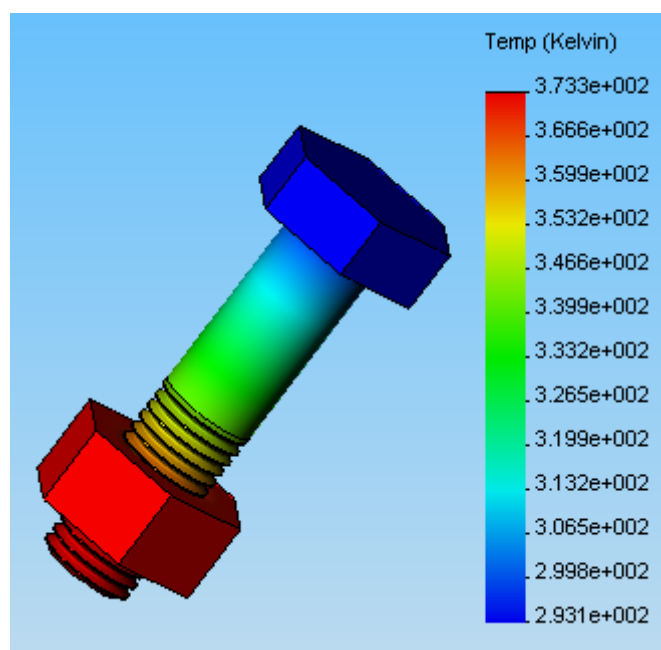
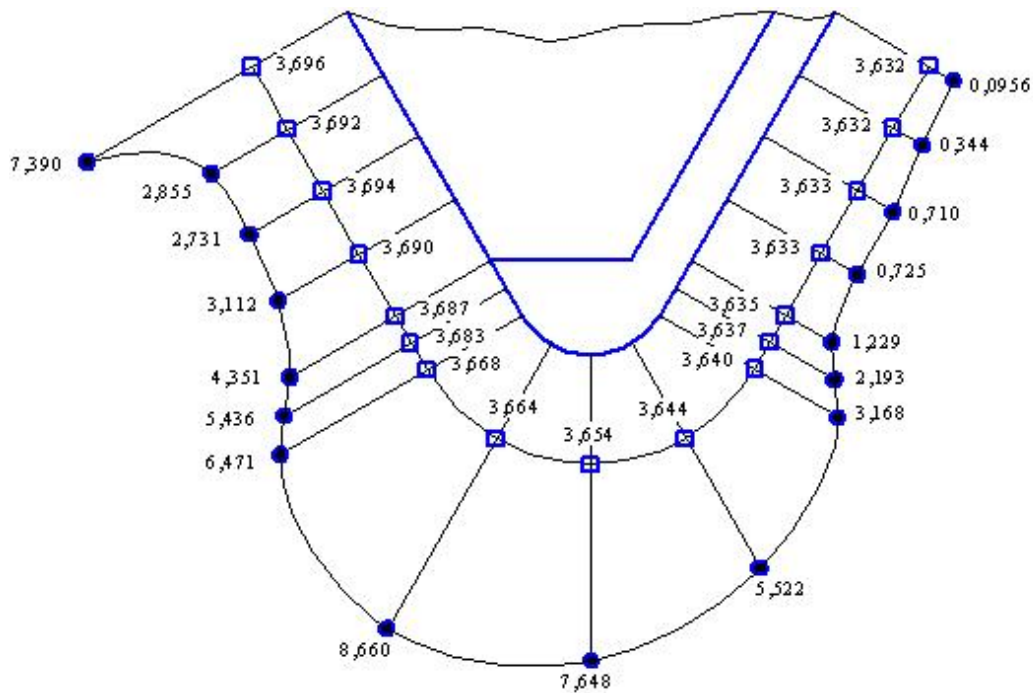


Рисунок 7 – Поле температур

На рисунке 8 приведены результаты расчета температур и градиента температуры по впадине первого витка. Из этого рисунка видно, что

максимальная температура имеет место в зоне контакта резьбы болта с резьбой гайки. А максимальный градиент температуры будет на впадине болта приблизительно под углом 30 градусов к оси симметрии впадины болта, следовательно, в этой зоне ожидаются наибольшие напряжения от температуры.



- - распределение градиента по впадине болта, $K/m \cdot 10^{-3}$
- - распределение температуры по впадине болта, $K \cdot 10^{-2}$

Рисунок 8 – Распределение температуры и градиента по впадине первого витка

Из результатов моделирования следует необходимость стабилизации трения, усилий, градиентов температур и пр. Наиболее эффективным способом реализации этих задач оказался способ наномодификации контактирующих поверхностей ультрадисперсным углеродом. Технология наномодификации болтов является коммерческой тайной и защищена ноу-хау Пензенского государственного университета.

Библиографический список:

1. Смогунов В.В., Волчихин И.В., Ноздрачев А.В. Конструкторско-технологическая надежность автономных систем управления. Пенза: ПГТУ, 1995. 106 с.

2. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

3. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.