

*Е.И. БАЙДА*, канд. тех. наук, доцент, НТУ "ХПИ"

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ НА СТАТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ ВАКУУМНОГО СИЛЬФОНА**

В статье рассмотрено влияние температуры нагрева контактной системы на внутренние напряжения в сильфоне вакуумного выключателя методом конечных элементов. Получена зависимость механических напряжений в материале в функции температуры при заданном ходе контактов. Показано, что наибольшие механические нагрузки испытывают места крепления сильфона к контактам и вакуумной камере. Значения механических напряжений в аварийных режимах работы могут превышать предел текучести при неправильно выбранном материале сильфона.

**Ключевые слова:** вакуумный сильфон, термомеханические напряжения.

**Введение.** Как было показано в [1], вакуумные сильфоны в процессе работы подвержены значительным статическим и динамическим нагрузкам [2-5]. О того как материал вакуумного сильфона противостоит этим воздействиям, во многом зависит срок службы и надежность работы выключателя.

Помимо механической деформации, которой подвержен сильфон в процессе движения контактов, на него воздействует также температура, до которой нагрета контактная система выключателя. Согласно [6], эта температура в номинальном режиме достигает  $(98-105)^{\circ}\text{C}$ , что вызывает дополнительные напряжения в материале сильфона по отношению к статическим и динамическим [7] напряжениям. Так как напряжения в материале сильфона не должны превышать предела текучести, то расчеты такого рода являются достаточно актуальными.

**Цель данной статьи** – рассчитать дополнительные напряжения, возникающие в материале сильфона вакуумных выключателей в зависимости от температуры нагрева контактной системы, хода подвижных контактов и действия атмосферного давления. Можно предположить, что дополнительные напряжения будут возникать в местах крепления сильфона за счет разности коэффициентов линейного расширения материалов контактов и сильфона.

**Основная часть.** На рис. 1 показана форма вакуумного сильфона и граничные условия, которые обеспечиваются креплением сильфона к элементам контактной системы.

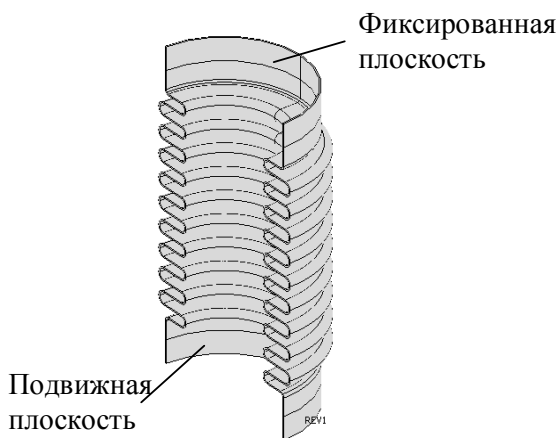


Рис. 1 – Вид половины сиффона

В качестве материалов для сиффонов используются высокопрочные жаростойкие стали с низким содержанием углерода – 08X18H10T, 12X18H10T, 36НХТЮ, 36НХТЮ5М, 40КХНМ и им аналогичные AISI 321 (США), DIN EN 1.4521 (Европа), SUS 321 (Япония). Эти материалы характеризуются значительными модулями упругости –  $(1.9 \cdot 10^{11} - 2.2 \cdot 10^{11}) \text{ N/m}^2$  и пределами текучести –  $(0.8 \cdot 10^9 - 2.5 \cdot 10^9) \text{ N/m}^2$ . Расчет проводился для стали 36НХТЮ с пределом текучести равным  $1.0 \cdot 10^9 \text{ Па}$  и модулем упругости  $2.0 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ .

Механические напряжения вычислялись при максимального значении хода контактов равном 8,7 мм с учетом атмосферного давления, действующего на сиффон.

Система уравнений при отсутствии внутренних объемных сил в Декартовой системе координат:

$$(\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x_i} + G \cdot \nabla^2 u_i - \frac{\alpha \cdot E}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (1)$$

где  $\lambda$ ,  $G$  - параметры Ламе;  $e$  – относительное удлинение по координатам;  $u$  - перемещение;  $\alpha$  - температурный коэффициент;  $T$  – температура нагрева;  $E$ ,  $\nu$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона,  $i=1..3$ .

Граничные условия:

- атмосферное давление, действующее на внешнюю поверхность сиффона;
- фиксация верхней границы;

- фиксированное значение хода нижней границы.

Расчет проводился в системе Comsol Multiphysics - 3.5. Результаты расчета напряжений в гофрированной части сиффона (за исключением плоскостей крепления), приведены на рис.2.

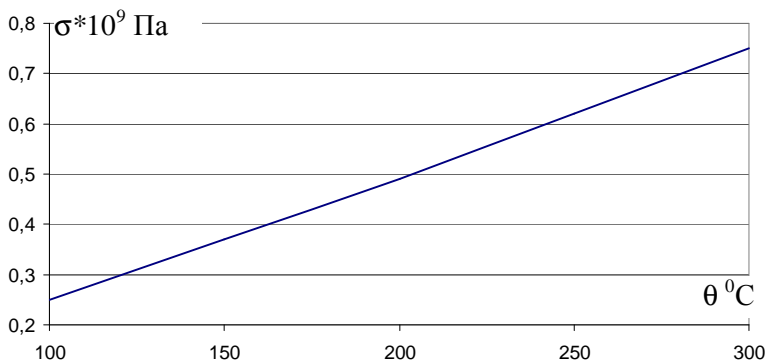


Рис. 2 – Зависимость напряжений в гофрированной части сиффона от температуры

Как видно из рисунка, внутренние напряжения в гофрированной части сиффона пропорциональны температуре и не превышают предел текучести. Особый интерес представляет определение линии локализации максимальных напряжений. На рис.3 показано распределение напряжений при максимальном ходе и температуре нагрева 100 °С и 300 °С.

Как следует из рис. 3, наибольшие напряжения сосредоточены по линии сопряжения сиффона контактов. Аналогичное положение линии локализации максимальных напряжений (место крепления сиффона) наблюдается и в других случаях. Причем, напряжения в области крепления определяются только температурой. Необходимо отметить, что температура оказывает значительно меньшее влияние на «свободные» области сиффона.

Как можно заметить (рис. 3), область распределения максимальных напряжений невелика по размерам и в меньшей степени подвержена циклическим нагрузкам, чем остальные области сиффона [7].

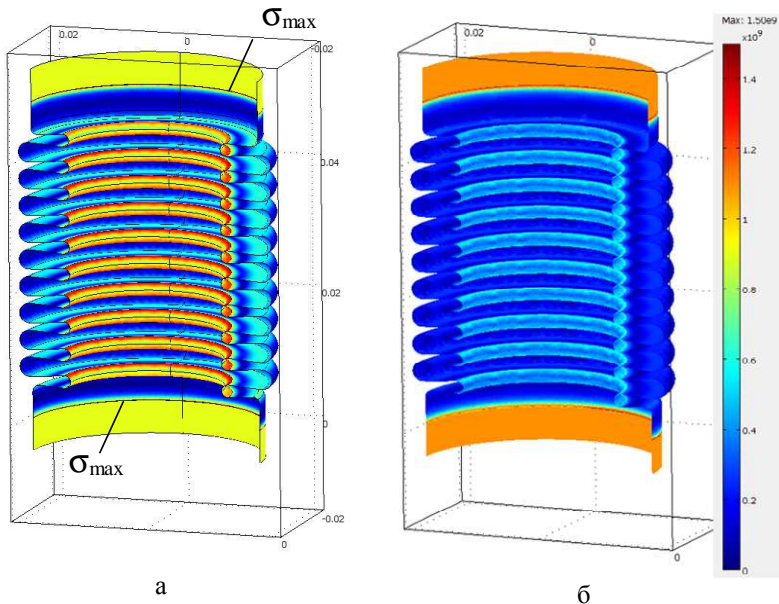


Рисунок 3 – Локализация максимальных напряжений в сильфоне при температуре нагрева: а – 100 °С; б – 300 °С.

Расчеты показывают, что максимальные напряжения в области крепления сильфона также растут пропорционально температуре и в случае нагрева контактов и сильфона до температуры 300 °С (допустимая температура нагрева при протекании аварийного сверхтока), напряжения превышают предел текучести выбранного материала в полтора раза ( $\sigma_{\max} = 1.5 \cdot 10^9$  Па).

**Выводы.** На основании решения уравнений (1) теории упругости [8, 9] рассчитано распределение напряжений в материале вакуумного сильфона. Из результатов решения следует: в номинальном режиме температурные напряжения соизмеримы со статическими и динамическими напряжениями деформации сильфона (рис.1); в аварийных режимах работы (температура нагрева 300 °С и выше) температурные напряжения в местах крепления сильфона могут превышать предел текучести материала.

**Список литературы:** 1. Байда Е.И. Расчет статической деформации сильфона вакуумных выключателей средних напряжений // Электротехника и электромеханика – Харьков, 2011. – №6. С. 15-16. 2. Сильфоны. Расчет и проектирование. Под ред. Л.Е. Андреев

вой. М., "Машиностроение", 1975. – 156 с. **3. Якушев В.Л.** Нелинейные деформации и устойчивость тонких оболочек. М.: Наука, 2004. **4. Ильичев В.А.** Исследование влияния формы сильфонов на долговечность: диссертация кандидата технических наук: 05.02.02 Ленинград, 1981, 188 с. **5. Полубояринова И.А.** Математические модели, методы и алгоритмы проектирования оболочек сильфонного типа специального назначения: диссертация кандидата технических наук: 05.13.12 Санкт-Петербург, 2003, 166 с. **6. Ткаченко С.А.** Оценка температуры контактной системы вакуумных камер // Ткаченко С.А., Жаворонков М.А. / Электротехника – Москва, 2010. – №11. С. – 32-35. **7. Байда Е.И.** Расчет динамической деформации сильфона вакуумных выключателей средних напряжений // Электротехника и электромеханика – Харьков, 2012. – №1. С. 15-18. **8. Френкель Я.И.** Курс теоретической механики. – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с. **9. Тимошенко С.П., Гудьер Дж.** Теория упругости: Пер. с англ. / Под редакцией Шандро Г.С. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bajda, E.I. "Расчет статической деформации сильфона вакуумных выключателей средних напряжений." *Electrical Engineering & Electromechanics* 6 (2011): 15-16. Print. 2. Bellows. Calculation and Design. Editor L.E. Andreeva. Moscow, "Machine Building", 1975. 156 p. Print. 3. Jakushev V.L. *Nelinejnye deformacii i ustojchivost' tonkih obolochek*. Moscow: Nauka, 2004. Print. 4. Iljichev V.A. *Issledovanie vlijanija formy sil'fonov na dolgovechnost'*. Dis. ... kand. tech. nauk. Leningrad, 1981. Print. 5. Polubojarinova I.A. *Matematicheskie modeli, metody i algoritmy proektirovanija obolochek sil'fonnogo tipa special'nogo naznachenija: Dis. ... kand. tech. nauk*. St-Petersburg, 2003. Print. 6. Tkachenko, S.A., Zhavoronkov, M.A. "Ocenka temperatury kontaktnoj sistemy vakuumnih kamer". *Jelektrotehnika* 11: 32-35. Print. 7. Bajda E.I. "Calculation of dynamic deformation of an intermediate voltage vacuum switch bellow". *Electrical Engineering and Electromechanics* 1 (2012): P. 15-18. Print. 8. Frenkel Ja.I. *Theoretical Mechanics*. Leningrad: Krasny Pechatnik, 1939. Print. 9. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill, 1970. Print.

*Поступила (received) 28.04.2014*