

УДК 621

*Л.В. АВТОНОМОВА*, канд. техн. наук, вед. н. с., НТУ "ХПИ",  
Харьков

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО  
СОСТОЯНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ГНЕЗДОВОГО  
ЗАЖИМА**

Запропоновано підхід до аналізу електротермонапруженого стану електричних з'єднань на прикладі V-образного гніздового затискачу. На базі чисельного методу скінченного елемента досліджено вплив напружено деформованого стану на зміни перехідного опору.

Предложен подход к анализу электротермонапряженного состояния электрических соединений на примере V-образного гнездового зажима. На базе численного метода конечного элемента исследовано влияние напряженно деформированного состояния на изменения переходного сопротивления.

**Введение.** Важнейшим элементом каждого электрического аппарата является его контактная система, определяющая надежность, экономичность и долговечность аппарата. Надежность соединительных контактов будет обеспечена, если сопротивление контакта электрическому току будет достаточно стабильно. Факторами, влияющими на работу контактов, являются: переходное сопротивление, температура зоны контакта, температура контактных элементов, температура окружающей среды, контактное усилие, габаритные размеры и интенсивность теплообмена с окружающей средой. Переходным сопротивлением определяется количество теплоты, выделяемое в контакте при данном токе. С повышением температуры зоны контакта увеличивается переходное сопротивление, что вызывает новое повышение температуры и т.д., вплоть до выхода контакта из строя. Следовательно, соединительный контакт должен противостоять как воздействию окружающей среды, так и механическим усилиям температурных деформаций [1]. Уменьшение переходного сопротивления и его стабильность может быть достигнута при повышении уровня контактного поджатия, увеличивающего эффективную площадь электрического контакта. В некоторых случаях при исполнении контактного соединения определенной конфигурации, термоупругие напряжения способст-

вуют увеличению контактного нажатия, что может гарантировать необходимый уровень переходного сопротивления. Так, например, конструктивное исполнение гнездового V-образного зажима, составные детали которого изготовлены из различных металлов, благодаря их термомеханическим свойствам, позволяет стабилизировать рост переходного сопротивления.

**Постановка задачи.** На рис.1 представлена общий вид и схема конструкции такого зажима, в которой обозначены: 1 – латунная планка и прижимной болт, 2 – алюминиевый провод, 3 – медная клемма, 4 – корпус, изготовленный из алюминиевого сплава, обладающие соответствующими механическими и теплофизическими свойствами. Учитывая осевую симметрию конструкции и прижимного давления, анализ его электротермомеханического состояния можно проводить для половины соединения, вводя соответствующие граничные условия симметрии на оси  $Y$  при  $x=0$ .

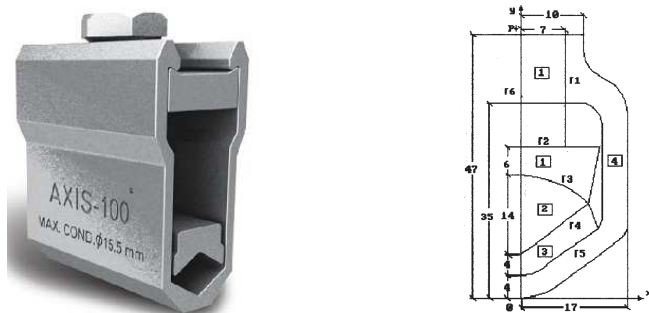


Рис. 1. Общий вид и расчетная схема гнездового зажима.

Для определения электротермонапряженного состояния такого сильноточного гнездового зажима необходимо решать связанную задачу электротермопластичности с соответствующими граничными и начальными условиями [2]. При решении токовой задачи считается, что начальное распределение плотности тока по сечению провода равномерное. Граничные условия для стационарной задачи электрического поля постоянных токов относительно потенциала  $\varphi$ :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{x=0} = 0; \quad (\varphi_1 - \varphi_2) / R_{\text{пер}} = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial n} \quad (1)$$

где  $R_{\text{пер}}$  – переходное сопротивление, а  $\rho$  – электропроводность металлов.

Для стационарной задачи теплопроводности граничные условия на оси  $Y$  и внешних границах (конвективный теплообмен со средой) заданы:

$$\partial T / \partial n = 0; \quad \lambda^* \partial T / \partial n = \alpha(T - T_0). \quad (2)$$

На границах  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$  составных частей гнездового зажима:

$$\lambda^* \partial T / \partial n = (T - T_0) / R_{\text{кт}}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  и  $\alpha$  – коэффициенты теплопроводности и линейного расширения металлов. Джоулево выделение тепла при прохождении тока учитывается введением объемных источников.

При решении задачи термоупругопластичности вводится условие закрепления, позволяющее устранить смещение зажима как твердого тела. Осуществление токопередачи между проводом и клеммой (граница  $\Gamma_4$ ) обеспечивается надежным поджатием осевой силой  $P$ , создаваемой моментом затяжки болта.

**Алгоритм решения задачи.** Основная особенность алгоритма решения контактной связанной электротермоупругопластической задачи заключается в итерационном разделении. Алгоритм расчета заключается в следующем:

1. Рассчитывается н.д.с. контактного соединения без токовых и тепловых нагрузок. Определяются величины электрического и термического переходного сопротивления. Поскольку, наиболее инерционным из электромагнитного и термомеханических полей является тепловое, то, прежде всего, необходимо обеспечить устойчивость решения уравнения теплопроводности.

2. Находится решение уравнения электромагнитного поля методом последовательных приближений: после вычисления поля для произвольно заданных постоянных, определяется ток на электродной площадке и начальные значения переменных, которые изменяются пропорционально интегральному току, заданного на электроде. Расчет электромагнитного поля выполняется в квазистатическом приближении.

3. По найденному распределению плотности тока определяются плотности источников джоулева тепловыделения. Определяется напряженно-деформированное состояние (н.д.с.) по найденному распределению температур и внешних усилий.

4. Результирующее напряженно-деформированное состояние влияет на величину контактного сопротивления как электрического, так и теплового, что также вызывает изменение распределения токов и температур в зоне электрического контакта. Из-за изменения этих параметров необходимо выполнять дополнительный цикл итераций по расчету электромагнитного и теплового полей.

5. Расчет электрического и теплового полей завершается, когда различие в распределении при последующих итерациях пренебрежимо мало (итерации выполняются по минимизации ошибки расчета тепло-

вого поля). После чего рассчитывается окончательно н.д.с. контактного соединения, включая определение зон контактирования и пластичности, и переходное сопротивление контакта.

**Численная реализация.** Задача электромагнитотермопластичности с учетом ее связанности решалась методом конечных элементов и результаты сравнивались с данными тензометрических исследований. При решении была получена зависимость линейных деформаций  $\epsilon$  от момента  $M$  затяжки болта равного 3кГм, представленная на рис. 2 (экспериментальная зависимость отмечена кружочками, а расчетная прямоугольниками). Как видно, зависимость носит убывающий характер, т.е. во внешней стенке зажима возникают напряжения сжатия.

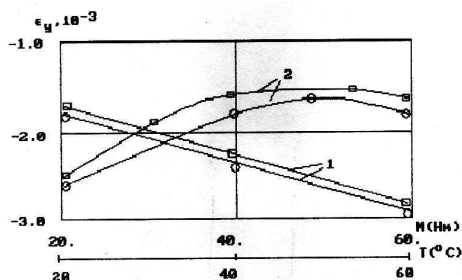


Рис. 2. Зависимость деформации в стенке корпуса от момента затяжки и температуры зажима.

Боковая стенка зажима при данной схеме нагружения испытывает воздействие растягивающей силы  $P$ , создаваемой нажатием болта на планку, и изгибающего момента, создаваемого силой  $P$  на плече, равном половине ширины зажима. Напряжения сжатия от изгибающего момента превышают напряжения растяжения от растягивающего усилия. Зависимость изменения результирующих деформаций при нагреве корпуса от протекающего тока представлена кривой 2.

Нагрев контактного соединения, затянутого моментом 3кГм, производился пропусканием тока 0,5-1,4  $I_{ном}$  до установившейся температуры. Как видно из графика при нагреве на 40°C деформации сжатия убывают по абсолютной величине по линейному закону, а затем с увеличением температуры несколько увеличиваются, что приводит к стабилизации переходного сопротивления.

На рис. 3 приведены графики распределения напряжения  $\sigma_y$  по сечению I-I при нагреве корпуса гнездового зажима на 20°C, 40°C, 80°C. соот-

ветственно. Наблюдается характерный спад сжимающих напряжений при  $40^{\circ}\text{C}$  и далее нарастание сжатия волокон при  $80^{\circ}\text{C}$ , т.е. рост сопротивления  $R_{\text{пер}}$  при нагреве на  $40^{\circ}\text{C}$  и стабилизация при нагреве на  $80^{\circ}\text{C}$ . Однако с появлением пластического деформирования корпуса гнездового зажима уменьшается поджатие прижимного болта, что может привести к росту переходного сопротивления на границе  $\Gamma_4$  и нарушению токопередачи между клеммой и проводом. Рост величины тока приводит к углублению зон пластического деформирования, размер которых практически пропорционален плотности протекающего тока.

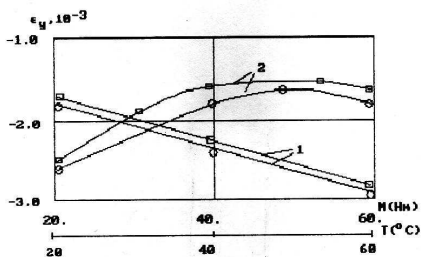


Рис. 3. Зависимость деформации в стенке корпуса от момента затяжки и температуры зажима.

**Выводы.** Для того, чтобы в процессе работы гнездового сильно-точного зажима происходила стабилизация переходного сопротивления и режим пропускания тока не нарушался, необходимо обеспечить упругое напряженно-деформированное состояние в процессе работы при соответствующем сочетании материалов составных частей, начального прижимного усилия и величины тока. Эффективно проведение предварительных расчетов для электрических соединений, подвергающихся воздействию интенсивных связанных электротермомеханических полей, что позволит рекомендовать его эксплуатационные параметры, обеспечивающие необходимый срок службы при гарантированной работоспособности.

**Список литературы:** 1. Дзекцер Н.Н., Висленев Ю.С. Многоамперные контактные соединения. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 128 с. 2. Ким Е.И., Омельченко В.Т., Харин С.Н. Математические модели тепловых процессов электрических контактов. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1977. – 236 с.

Поступила в редколлегию 31.01.2011  
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.