

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Климченкова Н.В., Климченков В.Т.

Донбасская государственная машиностроительная академия

ket@dgma.donetsk.ua

Scientific principles for analysis of unstable parameters have been worked out. Theoretical and experimental investigations have carried out. Recommendations on improvement of technology are presented.

Традиционно в тяговых электродвигателях локомотивов применяют арочную конструкцию коллектора. При этом коллекторное кольцо, собранное из медных пластин и изоляционных прокладок, размещают между составными частями стального корпуса, изолировав от них манжетами, и закрепляют стяжными элементами. Процесс изготовления конструкции включает: сборку кольца, его статическую формовку, сборку коллектора, его статическую формовку, динамическую формовку коллектора. Каждый вид формовки по времени делят на несколько одинаковых циклов, а каждый цикл – на одинаковые этапы. Цикл статической формовки содержит этапы: прогревание конструкции в электропечи, выпекание "сырых" изоляционных деталей, подпрессовка, охлаждение конструкции в холодильной камере, подпрессовка. Нагревание конструкции проводят до температуры полимеризации связующего вещества в материале изоляционных деталей, охлаждение – до температуры воздуха в цехе. К началу динамической формовки выпекание изоляционных деталей завершают, ее этапы сопровождаются вращением конструкции.

Следует сразу отметить недостатки традиционной технологии:

- в основу управления процессом положен анализ установившихся параметров, хотя большинство из них изменяется с переменной скоростью;
- выпекание изоляционных деталей в собранной конструкции сопровождается существенными изменениями давления на их поверхности, что негативно влияет на их качественные показатели;
- при статических формовках закрепляют детали в случайных неустойчивых положениях, полученных ими при сборке, а затем воздействуют на них центробежными силами для смещения в устойчивые рабочие положения, что оставляет возможности для радиального перемещения деталей в условиях эксплуатации локомотива (юз, боксование);
- минимальная температура охлаждения не соответствует зимним условиям эксплуатации локомотива (до -40°C), что не позволяет окончательно стабилизировать рельеф рабочей поверхности при динамической формовке;
- измерение биений рабочей поверхности и электрической прочности изоляции, проводимые в условиях динамической формовки, отклонений от допустимых пределов не обнаруживают, хотя в эксплуатационных условиях на коллекторный узел приходится до 40 % всех полных отказов двигателей.

Чтобы повысить эффективность технологии, следует расширить рамки расчета характерных параметров на переходные технологические режимы. Для этого необходим расчет температуры деталей и учет текущей пластической деформации изоляционных деталей.

Коллекторное кольцо составлено из большого количества деталей, что усложняет математическую модель тепловых процессов. Упрощение модели достигнуто путем выделения расчетного объема [1]. На рис.1 представлены половина пластины (1) и прокладка (2), входящие в него. Он неоднократно повторяется по окружности кольца, находится в одинаковых условиях по теплообмену среди других, изменение температуры в нем характерно для конструкции в целом.

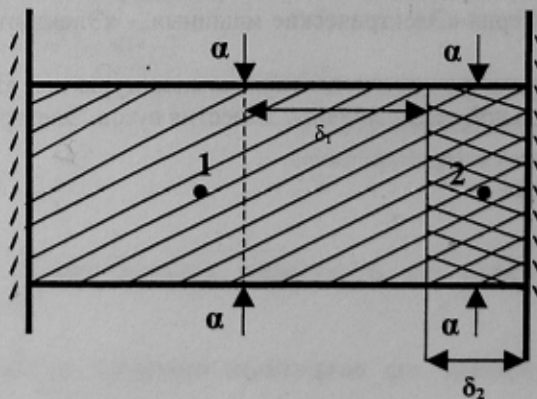


Рисунок 1 – Детали расчетного объема коллекторного кольца: 1-пластина, 2-прокладка

Математическое описание тепловых процессов при этом получило вид:

$$(\Theta_1 - \Theta_B) \cdot \alpha \cdot F_1 + C_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} + \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\delta_1 / \lambda_1 \cdot F + \delta_2 / \lambda_2 \cdot F} = 0; \quad (1)$$

$$(\Theta_2 - \Theta_B) \cdot \alpha \cdot F_2 + C_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial t} + \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{\delta_1 / \lambda_1 \cdot F + \delta_2 / \lambda_2 \cdot F} = 0; \quad (2)$$

$$\Theta_1(t) = \Theta_2(t) = \Theta_{нач} = 0, t = 0, \quad (3)$$

где $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_B, \Theta_{нач}$ – превышение температуры пластины, прокладки, воздуха в электропечи, начальное, град; α – коэффициент теплоотдачи наружных поверхностей, Вт/м²·град; F_1, F_2, F – площади наружных поверхностей пластины и прокладки, поверхности их сопряжения, м²; C_1, C_2 – полная теплоемкость пластины и прокладки, Вт с/град; δ_1, δ_2 – расчетные размеры деталей, м; t – время процесса, с.

Система уравнений (1-3) решена, получены аналитические выражения:

$$\Theta_1(t) = \Theta_{1нач} \cdot e^{k_1 t} + (1 - e^{k_2 t}) \Theta_{1у}; \quad (4)$$

$$\Theta_2(t) = \Theta_{2нач} \cdot e^{k_3 t} + (1 - e^{k_4 t}) \Theta_{2у}, \quad (5)$$

где начальные ($\Theta_{1нач}, \Theta_{2нач}$) и установившиеся ($\Theta_{1у}, \Theta_{2у}$) превышения температуры задают в зависимости от этапа нагревания или охлаждения кольца.

Выражения (4,5) отличаются от известных для режимов эксплуатации коллектора иными условиями выделения, распространения и передачи тепла. Данные об изменении температуры деталей кольца позволяют анализировать ход изменения термомеханических параметров, зависящих от температуры; оценивать текущее состояние материалов и всей конструкции; находить рациональные условия проведения этапов формовки; управлять процессом.

Из выражений (4,5) можно определять изменения средних температур пластин и прокладок. Контроль за физико-химическими процессами, происходящими в слоях материала прокладок при их выпекании, требует сведений о температуре по координатам толщины и радиусу кольца. Такие данные позволяют согласовать темп изменения температуры и давления на этапах нагревания и охлаждения, регулировать усилие запрессовки, задавать интервалы времени между очередными подпрессовками и величину усилия подпрессовки при выпекании прокладок. Дискретное температурное поле выделенного объема получено путем численного разностного способа решения дифференциальных уравнений теплопроводности на ПЭВМ[2,3].

Данные по температуре деталей позволяют перейти к расчету неустановившихся термомеханических параметров: температурного усилия, деформаций, давления на поверхности прокладок, механических напряжений. После сборки кольца с запрессовкой на пластину действует система сил арочного распора.

Во вращающемся коллекторе результирующая этих сил противоположна центробежной силе пластины. Нагревание опрессованной конструкции ведет к росту температурного усилия.

Давление на прокладку и напряжения в пластине изменяются в зависимости от величины усилия. Прирост усилия ΔN за некоторый интервал времени Δt определяется из баланса деформаций.

В нем учитывается увеличение линейного тангенциального размера пластины ($\Delta \delta_m$) и прокладки ($\Delta \delta_u$), а также усадка прокладок ($\Delta \delta_y$). Материал прокладок состоит из основы (слюда и др.) и связующего вещества (лак, смола и др.). По массе связующего 4-6 %. Полимеризация связующего при заданной температуре и давлении сопровождается выделением газообразных веществ и усадкой прокладок.

Из уравнения баланса деформаций получено выражение для дополнительного тангенциального усилия:

$$\Delta N_{\Theta} = \frac{\Delta \delta_m + \Delta \delta_u - \Delta \delta_y}{\delta_m / E_m F + \delta_u / E_u F} [H], \quad (6)$$

где E_m, E_u – модули упругости материалов, Н/м²; F – площадь поверхности сопряжения пластины с прокладкой, м².

Подход к расчету параметров статической формовки собранного коллектора аналогичен [2 – 4]. На рис.2 показаны детали расчетного объема коллектора.

В него входят половина пластины (1) и прокладки (2), части манжеты (3) и корпуса (4). Для контроля за физико-химическими процессами, происходящими в слоях материала манжет при их выпекании, необходимо знать температуру по координате толщины манжеты.

Математическое описание переходных тепловых процессов в манжете составлено при допущениях: рассматривается одномерное температурное поле по координате X толщины (δ) манжеты $\Theta(X, t)$; температура деталей кольца равна текущей температуре манжеты на границе их сопряжения ($X=0$); температура частей корпуса равна текущей температуре манжеты на границе их сопряжения ($X=\delta$); теплоемкости кольца и корпуса

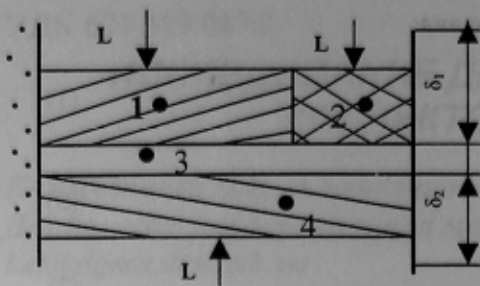


Рисунок 2 – Детали расчетного объема: 1-пластина, 2-прокладка, 3-манжета, 4-корпуса

с манжетой перенесены на границы манжеты. Математическая модель при этом получает вид:

$$\lambda \frac{\partial^2 \Theta(X, t)}{\partial X^2} = 0, t > 0, 0 \leq X \leq \delta; \quad (7)$$

$$\alpha(\Theta_B - \Theta) - c_1 \cdot \rho_1 \cdot \delta_1 \frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial X}, X = 0; \quad (8)$$

$$\alpha(\Theta_B - \Theta) - c_2 \cdot \rho_2 \cdot \delta_2 \frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial X}, X = \delta; \quad (9)$$

$$\Theta(X, t) = \Theta_{нач} = 0, t = 0, \quad (10)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала манжет, Вт/м·град; $\delta, \delta_1, \delta_2$ – расчетные размеры манжеты, пластины, корпуса, м; c_1, c_2 – удельные весовые теплоемкости кольца, корпуса, Вт·с/кг·град; α – коэффициент теплоотдачи наружных поверхностей кольца, корпуса, Вт/м²·град;

ρ_1, ρ_2 – плотность материала кольца, корпуса, кг/м³; $\Theta_B, \Theta_{нач}$ – превышение температуры воздуха в камере электропечи, начальное для манжеты, град.

Система уравнений (7-10) решена, получено выражение для превышения температуры манжеты:

$$\Theta(X, t) = (\alpha \cdot b_1 + b_2 \cdot b_3 - \alpha \Theta_B) \frac{X}{\delta} + b_1 [град], \quad (11)$$

где b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, зависящие от условий теплообмена сопряженных деталей коллектора.

Выражение (11) отличается от известного для режимов эксплуатации иными условиями выделения, распространения и передачи тепла. Оно позволяет находить текущую температуру кольца при $X=0$ и корпуса при $X=\delta$, а также температуру манжеты по координате толщины.

Изменения осевых линейных размеров пластины и корпуса в собранном коллекторе определяет текущую величину термомеханических параметров, поэтому был рассмотрен процесс теплопередачи между кольцом и корпусом через манжету. Математическое описание этого процесса получило вид:

$$(\Theta_1 - \Theta_B) \alpha \cdot F_1 + C_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} + \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\delta_1 / \lambda_1 F_3 + \delta / \lambda F_4 + \delta_2 / \lambda_2 F_5} = 0; \quad (12)$$

$$(\Theta_2 - \Theta_B) \alpha \cdot F_2 + C_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial t} + \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{\delta_1 / \lambda_1 F_3 + \delta / \lambda F_4 + \delta_2 / \lambda_2 F_5} = 0; \quad (13)$$

$$\Theta_1(t) = \Theta_2(t) = \Theta_{нач} = 0, t = 0, \quad (14)$$

где $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_B, \Theta_{нач}$ – превышение температуры пластины, корпуса, воздуха в камере, начальное, град; F_1, F_2 – площади наружных поверхностей пластины, корпуса, м²; $\lambda, \lambda_1, \lambda_2$ – коэффициенты теплопроводности материала манжеты, пластины, корпуса, Вт/м·град; F_3, F_4, F_5 – расчетные площади поперечного сечения пластины, манжеты, корпуса, м².

Система уравнений (12-14) решена, получены выражения для $\Theta_1(t)$ и $\Theta_2(t)$ по математическому виду аналогичные выражениям (4,5), но коэффициенты в них находят через иные исходные данные. Дискретное температурное поле собранного коллектора при статической формовке получено численным разностным способом решения дифференциальных уравнений теплопроводности, описывающих тепловой процесс [3,4].

Данные по изменению температуры деталей собранного коллектора позволяют перейти к расчету неустановившихся термомеханических параметров: осевого температурного усилия, деформаций, давления на поверхности манжет, механических напряжений. После сборки коллектора с запрессовкой усилием S и затягиванием стяжных элементов в конструкции возникает осевая Q и радиальная P составляющие этого усилия, показанные на рис.3.

Во вращающемся коллекторе действует центробежная сила коллекторного кольца C . Прирост осевого усилия за некоторый интервал времени Δt при нагревании конструкции определяется из баланса деформаций ее деталей. Давление на манжету и напряжения материала деталей меняются с изменением осевого усилия. Учтена усадка обеих манжет Δl_y при их выпекании. Связующее (склеивающее) вещество составляет 14 – 20 % от массы манжет. Полимеризация связующего дает их усадку. Из уравнения баланса деформаций получено выражение для дополнительного осевого температурного усилия:

$$\Delta Q_\Theta = \frac{\Delta l_M + \Delta l_u - \Delta l_C - \Delta l_y}{\frac{l_M}{E_M F_M} + \frac{l_u}{E_u F_u} + \frac{l_C}{E_C F_C}}, [H] \quad (15)$$

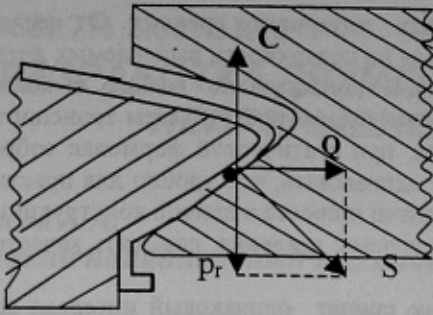


Рисунок 3-Система сил на рабочем участке манжеты

где $\Delta l_M, \Delta l_w, \Delta l_C$ – изменения осевых линейных размеров пластины, манжет, стяжного элемента в связи с изменениями их температуры, м; l_M, l_w, l_C – начальные расчетные осевые размеры деталей, м; E_M, E_w, E_C – модули упругости материалов, Н/м²; F_M, F_w, F_C – расчетные площади поперечного сечения деталей, м².

Расчет неустановившихся параметров процесса динамической формовки собранного коллектора проводится аналогично с процессом статической формовки [5]. В исходных уравнениях (8,9) и (12,13) учтено влияние вращения коллектора на величину коэффициентов теплоотдачи наружных поверхностей.

Получены аналитические выражения для определения неустановившейся температуры деталей. Применен численный разностный способ решения дифференциальных уравнений теплопроводности для получения дискретного температурного поля конструкции. Температурные усилия определяются в соответствии с выражениями (6,15). Воздействие центробежных сил на детали и конструкцию в целом учитывается известным способом.

В соответствии с представленным выше были проведены теоретические и экспериментальные исследования динамических воздействий при изготовлении коллектора тягового электродвигателя. Сведения о коллекторе: диаметр рабочей поверхности – 520 [мм]; длина рабочей поверхности – 121 [мм]; количество пластин в кольце – 348 [шт]; толщина прокладки – 1,27 [мм]; толщина манжеты – 2,4 [мм]; рабочее напряжение на манжете – 950 [В]; испытательная частота вращения – 2800 [мин⁻¹]. При проведении экспериментальных исследований применены тензорезисторы, термодпары, ртутный токосъемник [1-5]. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показало их достаточно хорошую сходимость.

Ниже приведены некоторые результаты исследований. На рис.4 показано с какой скоростью меняются тангенциальное (1) и осевое (2) температурные усилия на этапах прогрева коллекторного кольца и собранного коллектора. Очевидно, что ΔN_θ и ΔQ_θ нарастают с разной скоростью на отдельных интервалах времени процесса прогрева конструкций. В начале этапа темп высок, а далее падает. Указанное явление приводит к выдавливанию связующего вещества из материала, снижает механическую и электроизоляционную прочность, создает неоднородность свойств по координатам пространства и проявляется уже в условиях эксплуатации.

На этапах охлаждения конструкций скорости падения усилий соответствуют кривым на рис.4. Темп падения усилий наибольший в начале этапа, а далее падает. Подпрессовка конструкции в конце этапа резко восстанавливает давление на изоляционные детали, может вызывать смятие отдельных слоев по координате толщины, снижает качественные показатели выпекаемых деталей.

В экстремальных условиях эксплуатации локомотива недостатки технологии проявляются электрическим пробоем или смятием изоляционных манжет, смещением пластин и прокладок на рабочей поверхности, нарушением коммутации электродвигателя.

На рис.5 показано как изменяется усадка изоляционных прокладок (1) и манжет (2) при выпекании. Экспериментально установлено, что кривая усадки описывается экспонентой вида:

$$\Delta l_y = \Delta l \cdot e^{-kt} \quad [\text{мм}] \quad (16)$$

где Δl – полная усадка материала изоляционной детали по координате толщины за время выпекания, мм; k – коэффициент, зависящий от химического состава связующего вещества и его содержания по массе в детали; t – время выпекания час.

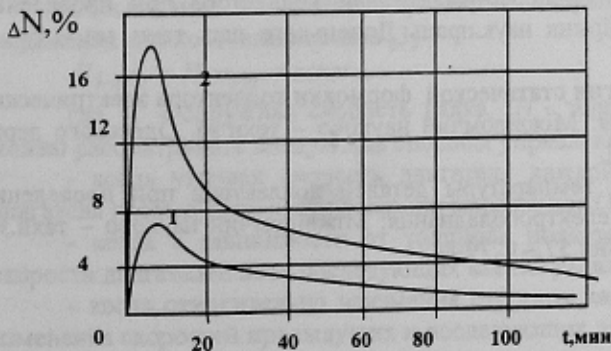


Рисунок 4 - Скорость изменения тангенциального (1) и осевого (2) температурных усилий

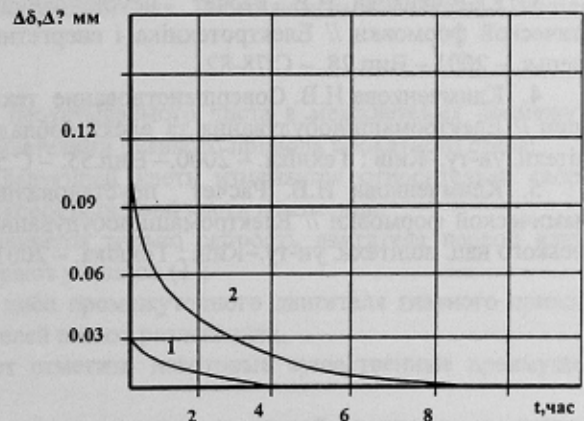


Рисунок 5-Изменение усадки изоляционных прокладок (1) и манжет (2) при выпекании

Из кривых видно, что скорость усадки различна на отдельных интервалах времени. От нее зависит текущая величина тангенциального и осевого усилия, падение давления на поверхности выпекаемых деталей. В существующем техпроцессе для восстановления заданного давления конструкцию кольца и коллектора вынимают из электропечи и мостовым краном перемещают к гидравлическому прессу, затем транспортируют обратно. При формовке кольца проводят 8 транспортных операций, при статической формовке собранного коллектора – 12. Интервал времени между подпрессовками принят одинаковый, что удобно для практики, но не увязано с закономерностями усадки. Совмещение функций электропечи и прессы в единой конструкции позволило бы исключить транспортные операции, стабилизировать величину давления, повысить качественные показатели выпекаемых деталей.

На этапах охлаждения конструкций кольца и коллектора тоже принят одинаковый интервал времени между очередными подпрессовками, что не согласовано с закономерностями снижения температуры деталей, величины усилий и давления. Совмещение функций холодильной камеры и прессы в одной конструкции позволило бы стабилизировать величину заданного давления и исключить транспортные операции.

Проанализировав результаты проведенных исследований, можно дать практические рекомендации по совершенствованию технологического процесса производства коллекторов электрических машин, направленные на повышение качественных показателей изоляционных деталей и эксплуатационной надежности выпускаемых коллекторов:

- при статической формовке конструкций коллекторного кольца и собранного коллектора следует увязать интервалы времени между очередными подпрессовками с закономерностью усадки конкретного материала изоляционной детали, выдерживая допустимый уровень отклонения давления от заданного при полимеризации связующего в этом материале;

- выпекание изоляционных деталей должно сопровождаться вращением конструкции с заданной для этих условий частотой, что позволяет деталям конструкции занимать устойчивое положение в пределах ее объема при изготовлении, не смещаясь в условиях эксплуатации;

- реконструкция технологического оборудования с целью совмещения функций электропечи и прессы в одной конструкции позволяет выпекать изоляционные детали коллектора (без затягивания стяжных элементов), выдерживая постоянное давление при полимеризации связующего вещества;

- при проведении динамической формовки коллектора следует учитывать воздействие максимальной отрицательной температуры зимних условий эксплуатации локомотива (при минимальной величине усилия арочного распора и частоте вращения соответствующей этим условиям), а также воздействие максимальной положительной температуры, допустимой по классу нагревостойкости изоляции, после такой формовки коллектор без повреждений выдерживает условия эксплуатации;

- на применяемом технологическом оборудовании затруднительно обеспечить благоприятные условия выпекания изоляционных деталей, поэтому выпекание этих деталей в специальных пресс-формах (с регулированием температуры и давления) до сборки коллектора обеспечивает необходимую закономерность регулирования давления, позволяет повысить однородность структуры изоляционного материала, механическую и электроизоляционную прочность детали, эксплуатационную надежность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климченкова Н.В. Совершенствование технологии формовки коллекторного кольца электрических машин // Збірник наук.праць Донецького держ.техн.ун – ту.Серія “Електротехніка і енергетика”:- Донецьк . – 2000.–Вип.17.– С.106-107.

2. Климченкова Н.В. Аналитический способ расчета температуры деталей коллектора в переходных технологических режимах статической формовки // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем :Сб. науч. Донбасской госуд. машиностр. академии . – Краматорск. – 1997.– Том 1. – С.255-258.

3. Климченкова Н.В. Расчет неустановившейся температуры деталей коллектора при проведении статической формовки // Електротехніка і енергетика:Збірник наук.праць Донецького нац. техн. ун – ту . – Донецьк. – 2001.– Вип.28. – С.78-82.

4. Климченкова Н.В. Совершенствование технологии статической формовки коллектора электрических машин // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвідомчий науково – техн.зб. Одеського держ. політехн. ун-ту.–Київ : Техніка. – 2000.– Вип.55. – С.58 -62.

5. Климченкова Н.В. Расчет неустановившейся температуры деталей коллектора при проведении динамической формовки // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвідомчий науково – техн.зб. Одеського нац. політехн. ун-ту.–Київ : Техніка. – 2001. – Вип.57.– С.79-84.

Надано до редакції:

6.10.2003

Рекомендовано до друку:

д.т.н., проф. Дуднік М.З.