



Конструкционная надежность узлов локомотива



Валентин КИСЕЛЕВ
Valentine I. KISELEV

Георгий СТРОКОВ
Georgy V. STROKOV



Киселев Валентин Иванович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Строков Георгий Владимирович — кандидат технических наук, директор ОАО «Милорем—Сервис», Москва, Россия.

Надежность локомотивов предопределяется во многом качеством конструкций отдельных деталей и узлов, их способностью обеспечивать эффективную и безопасную эксплуатацию подвижного состава. С учетом этого при участии авторов разработана конструкция стеклометаллического бандаж якорей тяговых электродвигателей, сочетающая прочность металлического и технологичность стеклобандаж.

Ключевые слова: локомотив, тяговый электродвигатель, надежность, прочность, якорь электромашины, крепление узла, бандаж, технологичность.

Надежность подвижного состава обусловлена организацией систем обслуживания, эксплуатации и в значительной степени — совершенством конструкций узлов и деталей, качеством их изготовления и ремонта. Правомочность этого утверждения может быть продемонстрирована на примере эволюции конструкции узла крепления лобовых частей обмоток якорей электрических машин. Ведь как показывает эксплуатация тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов, тяжелые последствия возникают нередко как раз в связи с разрушением бандажей таких креплений.

Применявшиеся на первом этапе создания ТЭД проволочные (металлические) бандажы обладали большой прочностью, но имели недостатки — высокую трудоемкость изготовления и возможность размотки при возникновении межвитковых замыканий обмотки якоря под бандажом.

На втором этапе существования конструкции узла вместо проволочных стали применять бандажы из стеклоленты типа ЛСБ-Е. Преимущество стеклоленты — высокая технологичность намотки, полностью исключая такую трудоемкую

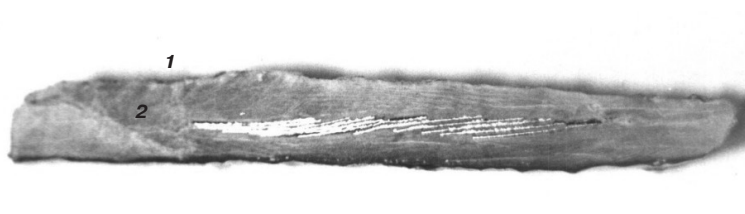


Рис. 1. Разрез стеклометаллического бандажа:
1 – стеклолента; 2 – металлическая лента.

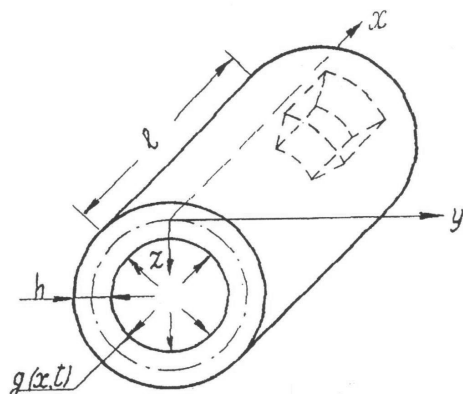
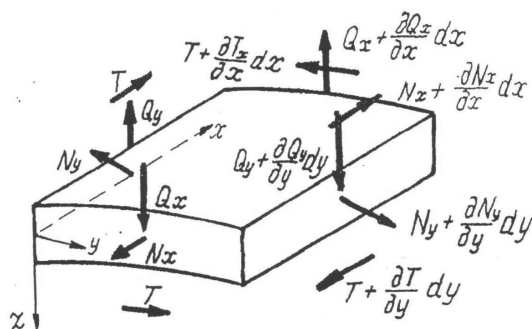


Рис. 2. Расчетная схема бандажа и бесконечно малого элемента оболочки.



операцию, как пайка бандажей оловом. Но этой конструкции присуща необратимая деформация под действием центробежных сил массы обмотки якоря, особенно в районе задних лобовых частей.

Поэтому на третьем этапе совершенствования бандажей крепления обмоток якоря решалась задача рационализации конструкции за счет сочетания преимуществ двух предшествующих вариантов – прочности металлических бандажей и технологичности стеклобандажей. Обновленная конструкция получила название стеклометаллического бандажа (СМБ) и защищена авторским свидетельством.

СМБ образуется из слоев стеклоленты путем наматывания в перекрышу с металлической лентой из стали. В процессе сушки якоря, предусмотренной технологической инструкцией ремонта, размягченная эпоксидная смола стеклоленты соединяет витки разнородных лент. В результате СМБ превращается в единое целое, становясь, по сути, монолитом (рис. 1).

Для расчета параметров СМБ он рассматривается как тонкая оболочка, поскольку толщина бандажа составляет менее 2% его диаметра. Поэтому представляется возможным использовать общие зависимости, относящиеся к тонким оболочкам. Отличительной особенностью общих зави-





$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\mu}{R} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\gamma}{g} \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} - \frac{\mu}{R} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\omega}{R^2} - \frac{1 - \mu^2}{Eh} q_a + \frac{\gamma}{g} \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

симостей в данном случае является сведение уравнений трехмерной задачи теории упругости к уравнениям для двух измерений. Одним из способов приведения трехмерной задачи к двумерной становится принятие гипотезы Кирхгофа-Лява, то есть недеформируемых нормалей.

В качестве основных координатных направлений взяты линии кривизны срединной поверхности бандажа. Применение гипотезы недеформируемых нормалей позволяет рассматривать нормальные и касательные напряжения как в срединной поверхности, так и в слоях бандажа ей параллельных.

Принято, что бандаж представляет оболочку цилиндрической формы постоянной толщины h и длиной L (рис. 2).

Моменты, нормальные и касательные усилия в сечениях бандажа:

$$\left. \begin{aligned} N_x &= \frac{Eh}{1 - \mu^2} \left\{ \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\omega}{R} \mu \right\}, \\ N_y &= \frac{Eh}{1 - \mu^2} \left\{ \mu \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\omega}{R} \right\}, \\ T &= \frac{Eh}{2(1 + \mu)} \frac{\partial v}{\partial x}, \\ M_x &= -D \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}, \quad M_y = -D \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \mu, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где E — модуль упругости материала бандажа;

μ — коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона);

R — радиус кривизны срединной поверхности;

D — цилиндрическая жесткость оболочки.

Уравнения колебаний бандажа имеют вид (2).

Нагрузки на элементы бандажа, обусловленные массами лобовых частей обмоток якоря, бандажа и динамическими воздействиями со стороны неровностей рельсового пути, кинематической погрешностью зубчатой передачи колесно-моторного блока, приняты периодическими:

$$P_x = P_a \cos \omega t$$

$$q_a = (1 + ax^2) \cos \omega t$$

где a — коэффициент увеличения распределенной нагрузки;

ω — частота возмущающих воздействий.

Интенсивность распределенной нагрузки $q_a(x, t)$ по длине бандажа берется изменяющейся по параболическому закону в соответствии с результатами экспериментальных исследований.

Гармонический характер внешних воздействий на бандаж позволяет разделить переменные в системе (2), представляя неизвестные функции деформации в виде произведения

$$U(x, t) = U(x) \cos \omega t$$

$$\omega(x, t) = \omega(x) \cos \omega t \quad (3)$$

и привести эту систему к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Решение уравнений колебания бандажа выполнялось с использованием метода операционного исчисления по одной переменной с учетом граничных условий, получаемых при рассмотрении физической

$$\left. \begin{aligned} X = 0 \quad \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0; \quad D \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} = g_0 2\pi R; \quad U_{(0)} = \omega_{(0)} = 0 \\ X = l \quad D \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = g_{max} 2\pi R; \quad U_{(l)} = \omega_{(l)} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

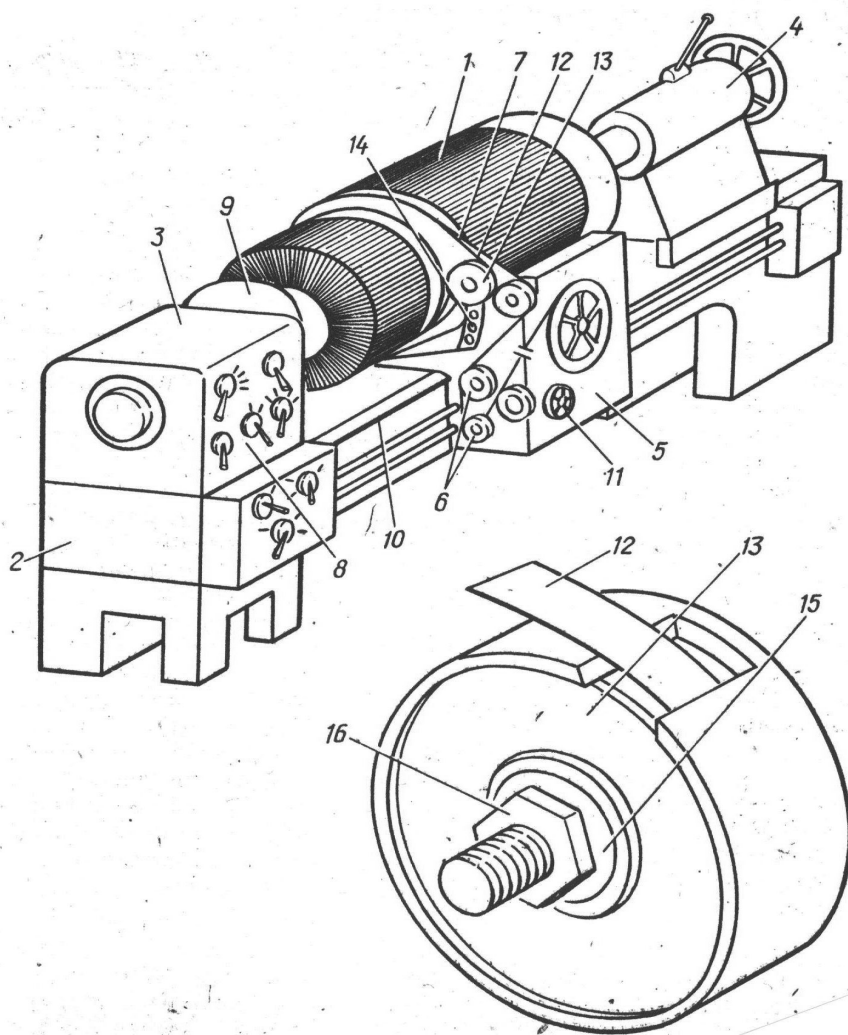


Рис. 3. Намотка стеклометаллического бандажа на якорь ТЭД:
 1 – якорь; 2 – бандажировочный станок; 3, 4 – центры; 5 – каретка; 6 – механизм натяжения;
 7 – стеклолента; 8 – коробка скоростей; 9 – шпиндель; 10 – зубчатая рейка; 11 – рукоятка; 12 –
 металлическая лента; 13 – катушка; 14 – кронштейн; 15 – тарельчатая пружина; 16 – нажимная гайка.

картины явлений, возникающих в результате деформации бандажа (4).

При известных граничных условиях перемещения $U(x)$, $w(x)$ дают значения деформации в каждом сечении по длине бандажа в зависимости от толщины бандажа и частоты вращения якоря ТЭД, что позволяет в дальнейшем получить величины напряжений и с их помощью рассчитать размеры бандажа.

Намотка СМБ (рис. 3) производится на серийных бандажировочных станках с дополнительной установкой на каретке станка ка-

тушки с расположенной в ней металлической лентой. Натяжение металлической ленты регулируется тарельчатыми пружинами, размещенными по торцам катушки.

Намотку бандажа осуществляют в следующей последовательности. При неполном натяжении стеклоленты наматывают полтора-два ее витка на лобовую часть обмотки якоря (для ее закрепления). Далее витки совершаются с натяжением, предусмотренным техническими требованиями.

После намотки нескольких слоев стеклоленты по всей длине бандажа (для





создания изоляции между обмоткой и металлической лентой) на расстоянии 5 мм от края сердечника якоря пропускают металлическую ленту под стеклоленту. На первой скорости вращения станка производится одновременная намотка обеих лент в направлении от сердечника к головкам лобовых частей обмотки якоря для заднего бандажа и к коллектору — для переднего. Намотку производят с перекрышей лент в соответствии с результатом аналитических расчетов. При получении необходимого числа витков металлической ленты, не снижая натяжения, ее отрезают и продолжают намотку стеклоленты до придания наружной поверхности бандажа цилиндрической формы. Процесс термообработки СМБ аналогичен процессу термообработки бандажа из стеклоленты.

Одновременной намоткой с равными скоростями и одинаковым усилием натяжения стеклоленты и металлической ленты обеспечивается равномерное расположение последней между стеклолентой, чем повышается надежность их соединения. Расположением металлической ленты внутри слоев стеклоленты достигается получение монолитной конструкции при термообработке бандажа.

Наличие металлической ленты в СМБ предотвращает его деформацию под действием центробежных сил массы обмотки якоря и улучшает условия охлаждения лобовых частей, так как теплопроводность металлических материалов значительно выше полимерных (стеклоленты).

Якоря с СМБ прошли обкатку на стендах взаимной нагрузки электрических машин испытательной станции в соответст-

вии с программой приемосдаточных процедур. Дополнительно проверялась прочность СМБ, проводились испытания ТЭД на нагрев и разрыв бандажа при двукратном увеличении частоты вращения (до 4000 мин⁻¹).

Результаты проверки показали, что СМБ обладает большей теплопроводностью, чем бандаж из стеклоленты. Нарушений технического состояния СМБ после испытания на разрыв при двукратном увеличении частоты вращения якоря электродвигателя не обнаружено.

Пробег опытной партии локомотивов с двигателями, оборудованными СМБ якорей, составил 1000000 км. При этом случаев выхода из строя ТЭД по причине ослабления бандажа или пробоя обмотки якоря под стеклометаллическим бандажом не выявлено.

Положительные результаты эксплуатации ТЭД с СМБ якорей позволили упростить требования по ремонту. В частности, разрешен выпуск из ремонта якорей с продольными круговыми трещинами любого числа, неограниченными по ширине, и пустотами бандажа, достигающими 1/3 длины его периметра.

Эксплуатация опытной партии якорей ТЭД типа ЭД118 со стеклометаллическими бандажами показала эффективность разработанной конструкции. Они рекомендуются к внедрению вместо проволочных бандажей и бандажей из стеклоленты.

Увеличенный пробег локомотивов с ТЭД, оборудованными усовершенствованной конструкцией узла крепления обмоток якоря, подтверждает преимущества предлагаемого технического решения. ●

STRUCTURAL RELIABILITY OF LOCOMOTIVE'S COMPONENTS

Kiselev, Valentine I. – D. Sc. (Tech), professor, head of the department of locomotives and locomotive facilities of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Strokov, Georgy V. – Ph.D. (Tech), director of JSC Milorem-Service, Moscow, Russia.

Reliability of locomotives depends largely on the quality of design of units and components, on their capacity to ensure efficient and faultless operation of rolling stock. The authors participated in

designing and engineering of glass-metal armature band of electrical traction motor. Such approach allows combining solidness of metallic band and manufacturability of glass binding.

Key words: locomotive, electrical traction engine, durability, reliability, faultlessness, armature, unit fastening, bandage, manufacturability.

Координаты авторов (contact information): Киселев В. И. (Kiselev V. I.) – kiselev40@mail.ru; Строков Г. В. (Strokov G. V.) – mlrz-service@mail.ru