

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНТАКТНЫХ ПРОВОДОВ

И.М. Соцкая

к.т.н., доцент, заведующая кафедрой технического сервиса
П.С. Орлов (фото)

д.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрификации
ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА

Контактные провода используются на электрифицированном транспорте и на грузоподъемных кранах с электроприводом. Электроснабжение кранов может осуществляться при помощи гибкого кабеля (Правила устройства электроустановок. Новосибирск 2005. С. 623, п.5.4.7. (4), с. 627, п. 5.4.29).

Среди недостатков гибких кабелей следует перечислить следующие:

- неизбежные многократные перегибы кабеля при перемещении крана ведут к поломке жил и снижению надежности электроснабжения крана;

- высокая скорость износа изоляционного покрытия кабеля в результате перемещений крана повышает вероятность пробоя изоляции и поражение электрическим током обслуживающего персонала.

Электроснабжение кранов преимущественно осуществляется при помощи главных троллеев, выполняемых, как правило, из стали (Правила устройства электроустановок. Новосибирск, 2005. С. 623, п. 5.4.7. (1), с. 626, п. 5.4.23).

Существенным недостатком стальных троллеев являются значительные габариты и вес троллейных проводников (вследствие высокого удельного сопротивления железа).

Известен медный контактный провод, предназначенный для питания энергией электрифицированного транспорта [1].

Медный контактный провод также не лишен недостатков:

- высокая плотность меди утяжеляет контактную сеть, приводит к усложнению монтажа и эксплуатации контактной сети, выполненной медным контактным проводом;

- высокая стоимость меди удорожает контактные сети.

Одним из направлений повышения эксплуатационных свойств контактных проводов является поиск нового способа создания облегченного медноалюминиевого контактного провода со стальным сердечником, предназначенным для питания энергией электрифицированного транспорта. Для облегчения провода его сердцевина выполняется из алюминия, а для повышения прочности и несущей способности используется стальной сердечник, алитированный за 1–3 цикла, каждый из которых состоит из операций разогрева поверхности стальной проволоки – сердечника до температуры 900° С в защитной атмосфере на глубину проникновения алюминия в сталь, погружения в ванну с расплавленным алюминием и интенсивного охлаждения до температуры 550° С после обработки алюминиевым

*Провод, сердечник,
алюминий,
алитирование, сталь,
термоциклирование,
криолит, медь*

*Wire, core, aluminium,
aluminizing, steel,
thermocycling, cryolite,
copper*

расплавом, находящимся под слоем расплава криолита. После чего сталеалюминиевый провод подвергается глубокому охлаждению в кристаллизаторе (для формирования алюминиевой оболочки – сердцевины) и пропускается через ванну с расплавом меди, находящейся под слоем расплава криолита, и кристаллизатор для формирования медной оболочки контактного провода.

При этом следует отметить важные признаки нового технического решения:

- разогрев поверхности стальной проволоки в защитной атмосфере на глубину диффузии алюминия препятствует образованию окислов железа на поверхности стали и обеспечивает заданную толщину диффузионного слоя;

- разогрев поверхности стальной проволоки до температуры 900°C и последующее интенсивное её охлаждение после обработки расплавом алюминия до 550°C обеспечивает осуществление фазовых $\alpha\text{-Fe} - \gamma\text{-Fe}$ и $\gamma\text{-Fe} - \alpha\text{-Fe}$ переходов в кратчайшие сроки и высокую производительность технологического процесса за счет ускоренного транспорта атомов алюминия в сталь в процессе фазового переноса за счет интенсификации диффузионных процессов;

- проведение от одного до трех циклов нагрева стали, обработки ее расплавом алюминия и охлаждения обеспечивает необходимую концентрацию атомов алюминия в стали на заданной глубине;

- наличие расплава криолита на поверхности расплавленного алюминия препятствует образованию окиси алюминия на поверхности расплава и обеспечивает высокое качество процесса алитирования стали;

- образующиеся в процессе алитирования на поверхности стали интерметаллические соединения обеспечивают плотное сцепление алюминиевого слоя со сталью и исключают отслоение алюминиевого покрытия,

- контакт разогретой стали с расплавом алюминия обеспечивает удаление следов окислов железа с алитруемой поверхности и обеспечивает высокое качество процесса;

- глубокое охлаждение в кристаллизаторе обеспечивает формирование на поверхности сталеалюминиевого провода алюминиевой оболочки – сердцевины медноалюминиевого контактного провода необходимой толщины;

- наличие расплава криолита на поверхности ванны с расплавом меди растворяет окись алюминия на поверхности сталеалюминиевого провода и обеспечивает образование в месте

контакта меди и алюминия медноалюминиевых сплавов;

- образующиеся на поверхности контакта алюминий–медь медноалюминиевые сплавы обеспечивают плотное сцепление алюминиевого слоя с медью и исключают отслоение медного покрытия контактного провода;

- охлаждение в кристаллизаторе обеспечивает формирование на поверхности сталеалюминиевого провода в алюминиевой оболочке (на сердцевине) медной оболочки контактного провода необходимой толщины и профиля;

- стальной сердечник обеспечивает высокую прочность контактного провода;

- замена части сечения контактного провода алюминием облегчает и удешевляет провод.

В армированных алюминиевых конструкциях связь между несущим стальным вкладышем и алюминием, чаще всего, чисто механическая, осуществляемая за счет сжимающего усилия затвердевающего алюминия (при заливке стального вкладыша алюминиевым расплавом), либо за счет запрессовки стального вкладыша в изготовленную деталь. Для повышения прочности сцепления на стальном прутке выполняют выступы, впадины, пазы или увеличивают шероховатость поверхности стальной детали струйной обработкой, накаткой или насечкой. Однако во всех случаях на границе контакта алюминиевого и железоуглеродистого сплавов имеются пленки оксидов и воздушный зазор, резко снижающие качество покрытия.

Трудность получения плотного биметаллического контакта заключается в большом сродстве алюминия с кислородом и в значительной прочности оксида алюминия Al_2O_3 . Алюминиевый расплав находится под слоем оксида алюминия, препятствующего смачиванию стали, а быстрое затвердевание пограничного слоя затрудняет его удаление.

Более прогрессивен способ получения биметаллических конструкций алитированием сталей, в результате чего образуется переходный слой – диффузионная зона, создающая хороший контакт стали с алюминиевым расплавом.

Известно несколько методов алитирования. Наиболее целесообразным следует считать алитирование погружением стали в расплав алюминия при температуре $700...800^{\circ}\text{C}$ с последующей выдержкой в течение $1...15$ минут, при которой достигается оптимальная толщина диффузионного слоя – $0,02...0,03$ мм. Основными преимуществами способа являются простота, быстрота про-

цесса и невысокая стоимость. Но на получение диффузионного слоя толщиной 0,35 мм требуется экспозиция $\tau = 60$ минут.

Вместе с тем, при термоциклировании стали в интервале температур 550–900°C в процессе фазовых α -Fe – γ -Fe и γ -Fe – α -Fe переходов в ограниченных объемах металл в результате перестройки кристаллической решетки оказывается в псевдожидком состоянии и при нагревании и при охлаждении граница фазового перехода перемещается вглубь металла, перенося с собой все примеси, в том числе и легирующие атомы к сердцевине детали. При «кристаллизации» псевдорасплава в первую очередь кристаллизуется железо, а примесь переносится псевдожидким железом вглубь детали, как при зонной плавке. Процесс полиморфного превращения облегчает проникновение легирующих атомов в псевдожидкий металл и обеспечивает интенсификацию процесса. Дифференциальное уравнение массопереноса атома внедрения стационарных и динамических процессов химико - термической обработки стали имеет вид [2]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -D \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial x} + A \frac{\partial P}{\partial x} + B \frac{\partial T}{\partial x} + X \frac{\partial^2 T}{\partial x \cdot \partial t} + Y \frac{\partial V_M}{\partial x} + C \frac{\partial \varphi}{\partial x} + C \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \cdot \partial t} \right) \cdot S \cdot M, \quad (1)$$

где $(\partial m / \partial t)$ – количество (масса) вещества, прошедшее через площадку S за время t (массоперенос);

$\partial^2 \Phi / (\partial x \partial t)$, $\partial^2 T / (\partial x \partial t)$ – скорости изменения градиентов магнитного потока и температуры – слагаемые, описывающие ускоренные электромагнитный и фазовый переносы атомов легирующей примеси по Орлову при полиморфных фазовых α -Fe – γ -Fe и γ -Fe – α -Fe превращениях в оптимальном температурном диапазоне при термоциклировании;

$(\partial c / \partial x)$; $(\partial P / \partial x)$; $(\partial T / \partial x)$; $(\partial \varphi / \partial x)$; $(\partial V_M / \partial x)$ – градиенты концентрации, давления, температуры, потенциала и изменения объема, описывающие соответственно собственно диффузионный массоперенос (по первому закону Фика), барический перенос по межкристаллитным и внутрикристаллитным пространствам (по Орлову), обеспечивающий проникновение легирующих атомов в сталь, теплоперенос в соответствии с уравнением Фика – Нернста, электроперенос (по Фромму и Гебхарту) и вакансионный перенос (по Мечеву);

D – коэффициент диффузии водорода в металле;

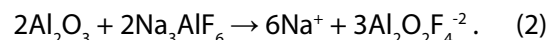
M – масса грамм – молекулы диффундирующего вещества;

A, B, C, Y, X – интегральные коэффициенты.

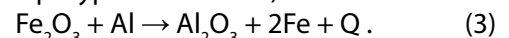
Скорость протекания технологического процесса при термоциклировании зависит от скорости изменения градиента температуры процесса. Фазовые превращения происходят не мгновенно по всему объему, а постепенно (в зависимости от степени перегрева или переохлаждения стали). Псевдожидкая волна полиморфного фазового превращения и при нагревании и при охлаждении перемещается с конечной скоростью с поверхности детали от источника нагрева (или от холодильника при охлаждении) к его сердцевине. Используя диаграмму образования аустенита при нагреве и диаграмму изотермического превращения переохлажденного аустенита, можно определить время выдержки алитруемых деталей при экстремальных температурах для получения заданной толщины диффузионного слоя.

При алитровании особое значение приобретают физико-химические явления, протекающие с большой скоростью, к которым относится образование оксидных плёнок на поверхностях твердого и жидкого металлов, мешающих возникновению связи между атомами железа и алюминия.

Для предупреждения образования оксидных плёнок при нагреве стали применяют защитную атмосферу. Введение расплава криолита в ванну с расплавом алюминия приводит к растворению пленки оксида алюминия, находящейся на поверхности ванны:



Нагретая поверхность стали со следами оксида железа восстанавливается жидким алюминием (первая стадия самораспространяющегося высокотемпературного синтеза):



Полученное восстановленное железо вступает в реакцию с алюминием с образованием интерметаллидного соединения Fe_xAl_y с выделением тепла (вторая стадия самораспространяющегося высокотемпературного синтеза). Конечный продукт химических реакций в виде интерметаллидов Fe_xAl_y является переходным слоем или диффузионной зоной между алюминием и железом, с толщиной слоя 0,02–0,03 мм при одном цикле нагрев – охлаждение.

Получение биметаллических конструкций алюминий – железо с диффузионной связью спо-

способствует образованию переходного слоя в виде интерметаллического химического соединения Fe_xAl_y в условиях непрерывности процесса.

Вследствие интенсивного протекания алюмотермической реакции, очищающей поверхность стали перед последующим алитированием, достигается высокая чистота поверхности конструкции. Сочетание СВС-процесса и алюмотермии в процессе обработки стали расплавом алюминия, автоматически приводит к образованию переходной зоны. Поэтому основные принципы этой технологии могут использоваться в различных отраслях техники для изготовления биметаллических сталеалюминиевых конструкций.

Использование данной технологии получения биметаллических конструкций (алюминий – сталь с диффузионной связью, образованной за счет металлотермии) и СВС-процесса, обладающей низким переходным электрическим сопротивлением и высокой прочностью сцепления стали с алюминием, обеспечивает монолитность конструкции. Кроме того, диффузионный слой стабилизирует электрический контакт между алюминием и стальной поверхностью, снижая электрическое сопротивление последнего. Всё это позволяет повысить рабочие характеристики биметаллических соединений.

Используя диаграмму образования аустенита при нагреве и диаграмму изотермического превращения переохлажденного аустенита, можно определить время выдержки алитируемых деталей при экстремальных температурах, для получения заданной толщины слоя. Если транспорт алюминия необходимо осуществить только в тонкий поверхностный слой сечения образца, то временная выдержка при температуре 900°C не осуществляется. Если необходимо осуществить транспорт алюминия в металл на 2–3 мм, то оптимальным будет вариант нагрева до температуры 760°C (верхняя граница температурного коридора) с выдержкой при той температуре 4...5 минут, так как в этом случае полное превращение феррита в аустенит может произойти только за время порядка 16 минут. Тогда за время экспозиции волна псевдожидкого полиморфного превращения, осуществляющая фазовый перенос и несущая алюминий, пройдет только четверть своего пути до сердцевины детали диаметром 20 мм и за 4 минуты изотермическое образование аустенита закончится только в поверхностном 2-х миллиметровом слое.

По С-образной кривой диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита определяем, что при температуре 680°C время полного полиморфного превращения $\gamma\text{-Fe}$ в $\alpha\text{-Fe}$ составляет порядка 16 минут. Тогда для получения двухмиллиметрового диффузионного слоя алюминия необходима выдержка при этой температуре (нижняя граница температурного коридора термоциклирования) в течение 4...5 минут.

Охлаждение сталеалюминиевого провода с алюминиевой оболочкой – сердечником медноалюминиевого провода обеспечивает формирование на его поверхности медной оболочки необходимой толщины и профиля, а наличие расплава криолита на поверхности ванны с расплавом меди растворяет окись алюминия на поверхности сталеалюминиевого провода и обеспечивает образование в месте контакта меди и алюминия интерметаллических соединений. Образующиеся на поверхности алюминия интерметаллические соединения с медью обеспечивают плотное сцепление алюминиевого слоя с медью и исключают отслоение медного покрытия контактного провода. Медь, диффундируя в алюминий, образует соединения, близкие по составу к дуралюминам, а диффундировавший в медь алюминий, образует соединения, близкие к составам алюминиевых бронз.

В соответствии с вышеизложенным, была разработана и опробована в лабораторных условиях методика насыщения стали алюминием импульсным методом. Стальные образцы из низкоуглеродистой стали в герметичных контейнерах с расплавленным алюминием подвергались импульсному воздействию электромагнитного поля. Верхний предел температурного интервала 900°C , нижний – 550°C . Выдержка при экстремальных температурах составляла не менее 5 минут. Варьировались длительность и количество циклов. Полное время обработки при любом из опытов не превышало полутора часов. Проникновение алюминия в сталь осуществлено по всему сечению образца в течение 7 циклов.

Проведенный эксперимент подтверждает возможность получения медноалюминиевого контактного провода со стальным сердечником.

Замена части сечения контактного провода алюминием облегчает и удешевляет провод, а стальной сердечник обеспечивает высокую прочность контактного провода.

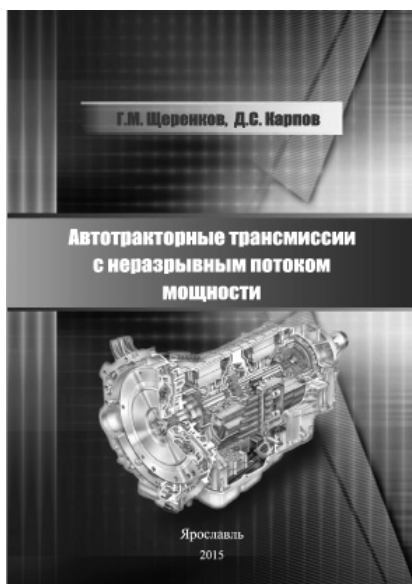
Литература

1. Белоруссов, Н.И. Электрические кабели провода и шнуры [Текст] / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева. – М.: Энергия, 1979. – 536 с.
2. Орлов, П.С. Методика ускоренного процесса алитирования [Текст] / П.С. Орлов, Л.А. Голдобина, В.П. Гусев, В.С. Шкрабак // Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина. – 2009. – № 1. – С. 73–77.

References

1. Belorussov, N.I. Jelektricheskie kabeli provoda i shnury [Tekst] / N.I. Belorussov, A.E. Saakjan, A.I. Jakovleva. – M.: Jenergija, 1979. – 536 s.
2. Orlov, P.S. Metodika uskorenного processa alitirovanija [Tekst] / P.S. Orlov, L.A. Goldobina, V.P. Gusev, V.S. Shkrabak // Vestnik MGAU im. V.P. Gorjachkina. – 2009. – № 1. – S. 73–77.

ОБЪЯВЛЕНИЕ



В издательстве ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА в 2015 г. вышла монография «Автотракторные трансмиссии с неразрывным потоком мощности» / Г.М. Щеренков, Д.С. Карпов.

В монографии кратко рассмотрены схемы и конструкции, преимущества и недостатки автоматических трансмиссий. Подробно анализируется работа таких трансмиссий, содержащих узлы трения. Описано их устройство и условия работы в среде смазочно-охлаждающей жидкости.

Монография предназначена для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов инженерных факультетов, а также для инженерно-технических работников, занимающихся эк-

сплуатацией, ремонтом и обслуживанием автомобилей и тракторов.

УДК 629.114.2.001.63; ББК 39.34;

ISBN 978-5-98914-143-2; 60 стр. (мягкий переплет)

**ПО ВОПРОСАМ ПРИОБРЕТЕНИЯ ОБРАЩАТЬСЯ ПО АДРЕСУ:
150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58, ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА**

e-mail: vlv@yarcx.ru