

# Графит высокой плотности для контактных вставок токоприемников

Известно, что использование угольных контактных вставок в полозах токоприемников электроподвижного состава позволяет значительно увеличить срок службы двух таких важных компонентов электродинамического взаимодействия (токосъема), как токоприемник и контактный провод, так как эффект самосмазывания графита, когда его частицы переносятся на медный контактный провод, способствует образованию хорошо отполированной поверхности контакта, что приводит к совместному снижению износа в этой паре трения. Вместе с тем применение угольных вставок обуславливает появление специфических проблем, особенно при системе тягового электроснабжения постоянного тока 1,5 кВ из-за высокой интенсивности токосъема (при системе переменного тока такие проблемы не возникают).

## История вопроса

Национальное общество железных дорог Франции (SNCF) уже более 20 лет назад приняло решение об инвестициях в графитовые технологии применительно к токоприемникам всего электроподвижного состава, получающего питание от контактной сети переменного тока 25 кВ, 50 Гц. Тогда ставка делалась на массовую замену металлических

контактных накладок токоприемников угольными вставками, несмотря на то что поверхность последних иногда разрушается и частицы графита агрессивно воздействуют на контактный провод.

Так, после преодоления некоторых трудностей, обусловленных не поддававшимся прогнозированию износом контактного провода, был успешно завершён полный перевод на угольные контактные вставки

токоприемников всех электропоездов, обращавшихся на пригородных линиях северного направления от Парижа.

В 1995 г. по настоянию транспортной администрации Парижа (RATP) перед открытием линии D сети скоростных сообщений RER токоприемники двухсистемных электропоездов серии Z 20500 были в экстренном порядке модифицированы для обеспечения связности пригородных линий юго-восточного (с напряжением 1,5 кВ постоянного тока) и северного (с напряжением 25 кВ, 50 Гц переменного тока) направлений от Парижа. На самом деле RATP использовала токоприемники с угольными вставками на линиях A и B сети RER начиная с 1975 г., полностью отказавшись от токоприемников с металлическими контактными накладками на линии, соединяющей Лионский и Северный вокзалы.

Время показало, что это решение было правильным. Срок службы угольных контактных вставок (по пробегу) с 4000 км в начале эксперимента через 2 года возрос до 72 тыс. км. Этот опыт доказал, что ресурс графита может быть увеличен, несмотря на обращение на тех же линиях токоприемников с металлическими контактными накладками.

Достижению такого результата (рис. 1) способствовали два условия: качественное смазывание и изменившееся соотношение между числом токоприемников с угольными контактными вставками и металлическими накладками.

При максимальной скорости движения электропоездов, равной 140 км/ч, к техническим характеристикам токоприемников не предъявляют особо жестких требований. Потребляемый ток на стоянках составляет порядка 100 А, в движении — не более 1200 А (400 А на каждую вставку).

Поэтому SNCF инициировало программу исследований по проблемам токосъема при токе порядка

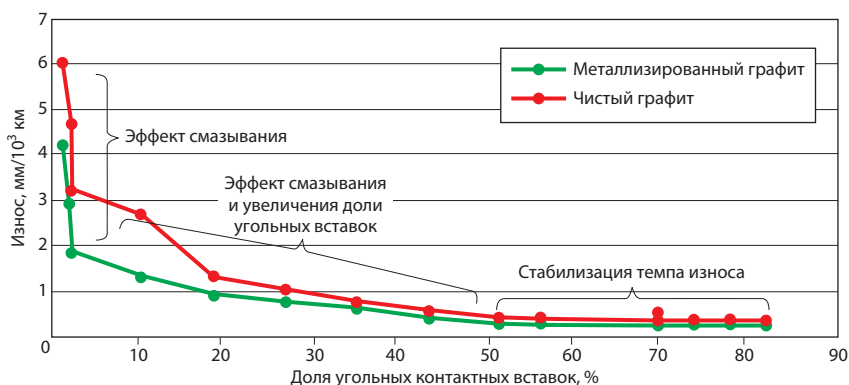


Рис. 1. Износ контактных вставок токоприемников на линии D сети RER

150–200 А на каждую контактную вставку на стоянках и 1000–1200 А в режиме тяги. Конкретная цель в данном случае заключалась в выборе токоприемников и контактных вставок для высокоскоростных электропоездов типа TGV Atlantique.

У поездов TGV Atlantique расчетный ток на каждый токоприемник составляет 1800 А в движении и 300 А на стоянках при максимальной скорости 220 км/ч на обычных и 270 км/ч в пиковом режиме работы на высокоскоростных линиях. При этом у одиночно следующего поезда одновременно подняты два токоприемника, у двоянно-го — четыре.

Со времени запуска этой программы в 1999 г. и ее успешной реализации прошло уже более 10 лет.

### Проблематика, испытания, результаты

#### Токосъем в движении

**Системные ограничения.** Тяговый ток поступает от контактного провода на конструкцию токоприемника и далее в тяговый привод электроподвижного состава через угольные контактные вставки, наклеенные или приваренные к металлическому полозу. Высокое естественное сопротивление графита совместно с большими токами приводит к нагреву вставок. Тепловая энергия (а следовательно, и температура нагрева) рассеивается от точки контакта с контактным проводом до соединения с металлическим основанием.

В то же время нагрев ограничивается — частично благодаря зигзагу контактного провода, вследствие которого точка контакта на контактной вставке постоянно меняет свое местоположение, а поверхность контакта очищается, и частично за счет естественного охлаждения встречным потоком воздуха.

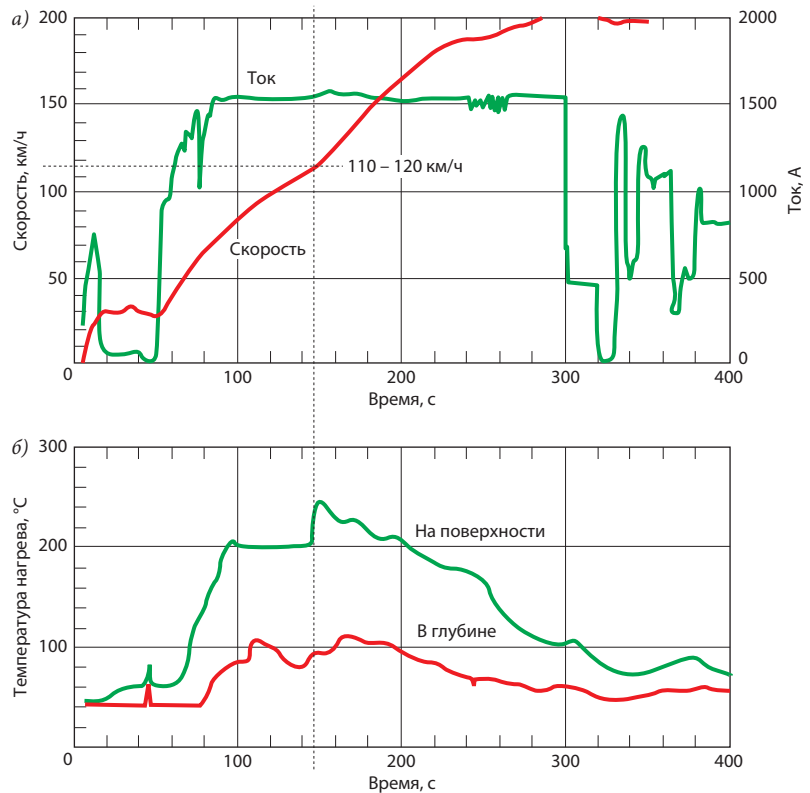


Рис. 2. Режимы движения (а) и нагрев контактной вставки (б)

На рис. 2 показано изменение температуры контактной вставки при трогании и движении высокоскоростного электропоезда типа TGV РВКА в режиме тяги на подъеме крутизной 20‰ со скоростью до 200 км/ч.

**Исследование токосъема в движении.** Для этих испытаний использовался токоприемник типа СХ, обычно применяемый на электроподвижном составе постоянного тока, а составность опытного поезда подбирали исходя из условия поддержания достаточного уровня тока. Начиная со скорости 30 км/ч ток резко возрастал и, соответственно, повышалась температура на поверхности контактных вставок. Затем по мере достижения скорости 110–120 км/ч, при которой воздушное охлаждение недостаточно эффективно, тепловая энергия перемещалась вглубь материала вставок.

По миновании этого момента скорость воздуха, обтекающего токоприемник, становилась

достаточной для обеспечения охлаждения контактных вставок. Затем ток уменьшался через регулирование скорости, и риска для контактных вставок не было вплоть до следующего повышения скорости.

Одной из сложных проблем является достижение прочной связи между графитом и металлическим основанием, для чего можно использовать технологии пайки (олово, олово/серебро) или склеивания (эпоксидный клей и т. п.). Последняя технология предпочтительнее, так как обеспечивает более однородное сцепление почти по всей площади контакта.

Действительно, при токе более 800–900 А неизбежно происходит расплавление олова, если не применять усилители или устройства для искусственного «дренирования» тока, которые значительно увеличивают массу контактных вставок. Увеличение числа вставок или их ширины представляет собой решение, имеющее ограничения с точки



Рис. 3. Опытный поезд с вагонами Vulcain и Lucie

зрения возрастания динамической массы токоприемника и риска снижения качества токосъема, а следовательно, и ограничения скорости движения.

Другим рассматриваемым критерием является степень износа графита, темп которого может стать неприемлемым в случае несоответствия между выбранным материалом и интенсивностью токосъема. Чрезмерный нагрев со своей стороны может стать причиной разрушения связи графит/основание.

**Внедренные решения.** Натурные испытания на высокоскоростных электропоездах семейства TGV являются весьма представительным, но при этом дорогостоящим мероприятием, так как каждый раз

необходимо повторять испытательные пробеги с исследованием разных материалов.

Поэтому испытания, результаты которых приведены на рис. 2, проводились с использованием специального вагона Vulcain.

Этот вагон, выполненный на базе четырехосного грузового вагона, оснащен токоприемником и несколькими группами резисторов, что позволяет создавать управляемые, контролируемые и повторяющиеся циклы токовой нагрузки, моделируя таким образом разные режимы токосъема. Обычно вагон Vulcain используется совместно с измерительным вагоном Lucie, принадлежащим испытательно-технической лаборатории SNCF (IGLE). Регулирование тока осуществляется в пределах до 2000 А при напряжении 1800 В постоянного тока.

Так, последовательное выполнение целого ряда идентичных циклов токовой нагрузки (2000 А в течение 10 мин + 600 А в течение 10 мин и т. д.) за одну испытательную поездку практически невозможно реализовать на обычном подвижном составе вследствие меняющегося профиля линии и других условий.

Испытания со скоростью до 120 км/ч проводятся, как правило, на тепловозной тяге, что позволяет обеспечить достаточную их «чистоту» (рис. 3).

Для дальнейших испытаний были оставлены только те контактные вставки, которые имели лучшие показатели по сопротивляемости износу и воздействию высокой температуры, определяющие стабильность токосъема.

Следы перегрева, трещинообразование и отслаивание графита являются признаками неудовлетворительного качества контактных вставок. В частности, температурные повреждения и повышенный износ зачастую свидетельствуют об ухудшении связи между графитом и металлическим основанием, что неизбежно ведет к разрушению вставок.

Испытания с вагоном Vulcain позволили протестировать до 30 марок графита различных европейских компаний-поставщиков (Mersen, Schunk, Hoffmann, Morgainite и Gerken).

**Результаты испытаний.** На рис. 4 показаны результаты испытаний контактных вставок, изготовленных из графита разных марок. Они позволяют сделать следующие основные выводы:

- угольные вставки с креплением пайкой имеют очень сильный износ и тенденцию к расплавлению олова. Поэтому от такого крепления отказались в пользу склеивания;

- для вставок из обычного графита, в том числе металлизированного, характерна склонность к повышению температуры при интенсивном токосъеме. Зарегистрированные значения температуры в диапазоне между 150 и 250 °С неприемлемы из-за ослабления связи между графитом и металлическим основанием;

- только разработанные компаниями Mersen и Hoffmann специальные материалы, получившие название «графит высокой плотности», обеспечивают допустимые уровни износа и температуры. Их средний уровень температуры составляет порядка 100 °С (135 °С у графита Hoffmann и 95 °С у графита Mersen), что обеспечивает

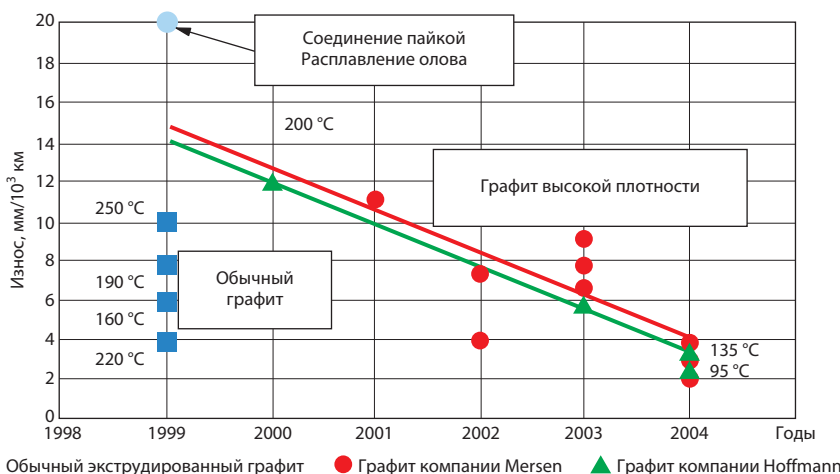


Рис. 4. Результаты испытаний контактных вставок из графита разных марок

достаточную надежность крепления с учетом характеристик существующих промышленных клеев.

Испытания с вагоном VulcaIn имеют особое значение, так как режимы токосъема в ходе этих испытаний существенно строже, чем в регулярной эксплуатации. Поэтому выявляемый в ходе испытаний запас по техническим параметрам позволяет компенсировать имеющиеся отклонения в качестве изготовления контактных вставок и гарантировать их работоспособность в экстремальных условиях, таких, например, как обледенение.

Следует отметить, что из 30 типов испытанных угольных контактных вставок только половина показала результаты, которые можно считать вполне удовлетворительными. С другой стороны, даже в случае благоприятных результатов исследования токосъема в движении следует иметь в виду, что достижение поставленных целей в данном случае менее сложно, чем при токосъеме на стоянках.

#### Токосъем на стоянках

**Системные ограничения.** Трудность задачи в данном случае заключается в ограничении температуры в точке контакта между медным контактным проводом и контактной вставкой из материала с малой проводимостью, которая составляет 10 Ом·м у чистого графита и 3 Ом·м у металлизированного.

На рис. 5 показана зависимость температуры от тока на участке контактного провода из чистой меди с площадью поперечного сечения 107 мм<sup>2</sup> в точке контакта и на расстоянии 400 мм от нее (здесь действует только закон Джоуля).

Видно, что температура быстро возрастает в зависимости от контактного сопротивления и тока.

Нагрев в данном случае является чисто локальным явлением, которое, если его не контролировать,

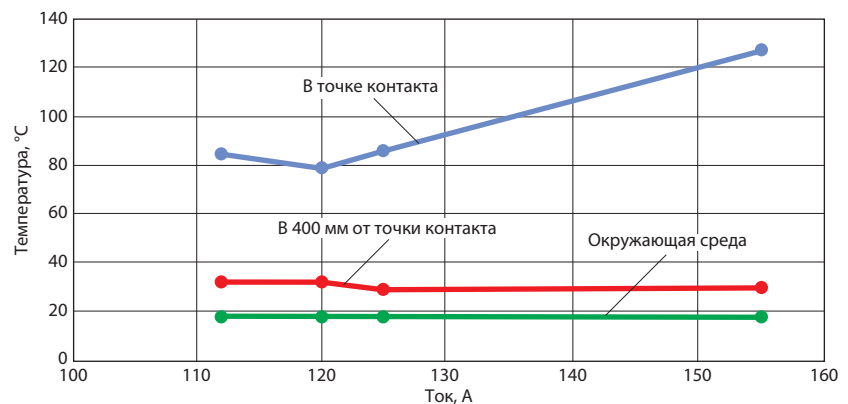


Рис. 5. Нагрев контактного провода при токосъеме на стоянке

может повредить контактный провод.

**Предельный нагрев медного контактного провода.** В специальной литературе в качестве предельной для контактного провода из чистой меди упоминается температура 200 °С, после которой его сопротивление на разрыв снижается практически вдвое. Такое ухудшение механических характеристик приводит к обрыву контактного провода под механическим воздействием натяжного оборудования (грузовых компенсаторов) или от собственной массы.

На рис. 6 показана типичная форма концов оборвавшегося медного контактного провода, который подвергся местному перегреву с последующим удлинением вплоть до разрыва.

**Термическая усталостная прочность.** С другой стороны, необходимо также учитывать термическую усталость. Действительно, поезда чаще всего останавливаются в определенных местах перед знаками системы сигнализации, у посадочных

платформ или на путях обслуживания (экипировки). Поэтому здесь токоприемники снимают ток на весьма малой длине контактного провода, что провоцирует повторяющийся нагрев в одних и тех же местах.

Накопление таких последовательных отжигов приводит к риску появления зон охрупчивания контактного провода.

SNCF с помощью Технического центра машино- и материаловедения (CETIM) провело исследования с целью определения предельных критериев предела термической усталости. Такие характеристики, как предел упругости, предел прочности на растяжение, относительное удлинение и микротвердость, измерялись на образцах, подверженных повторяющимся циклам термического нагружения в температурном диапазоне от 80 до 200 °С.

Полученные результаты позволили определить температуру 120 °С в качестве предельной для нагрева контактного провода, что и

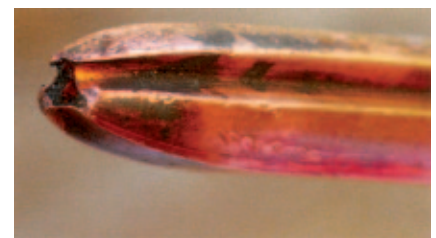


Рис. 6. Концы оборвавшегося контактного провода

было принято в европейском стандарте EN 50119.

Применение контактного провода из сплавов меди с оловом или серебром, как это практикуется на сети железных дорог Нидерландов, повышает предельно допустимую температуру до 130 или 150 °С соответственно.

На сети линий железных дорог Франции, электрифицированных на постоянном токе 1,5 кВ, контактный провод на большей части длины изготовлен из чистой электролитической меди, обеспечивающей коэффициент проводимости, равный 98%. Это сделано с целью ограничения нагрева контактного провода при передаче электроэнергии на дальние расстояния. Однако такой выбор делает эту сеть наиболее уязвимой в Европе по критерию токосъема на стоянках.

*Внедренные решения.* С целью ограничения простоя подвижного состава и загрузки персонала при каждом цикле испытаний SNCF решило построить в Агентстве по железнодорожным испытаниям (AEF) стенд для исследования токосъема (рис. 7), на котором можно имитировать сложные условия взаимодействия между контактным проводом и контактными вставками токоприемников при токосъеме на стоянках.

На этом стенде измерение температуры выполняется непосред-

ственно в точке контакта в контролируемых условиях окружающей среды, что позволяет воспроизводить результаты испытаний и чего трудно добиться в реальных условиях эксплуатации.

Стенд оборудован двумя контактными проводами из чистой меди или медных сплавов, подверженных механическому натяжению, близкому к имеющему место в реальной эксплуатации. Токоприемник заменен системой опирания контактной вставки, которая может создавать регулируемую статическую силу ее прижатия к контактному проводу. Стенд позволяет реализовывать все возможные циклы нагружения током, потребляемым электроподвижным составом.

В протоколе испытаний отражены следующие реальные условия эксплуатации перспективных токоприемников для высокоскоростных электропоездов TGV, получающих питание от сети постоянного тока 1,5 кВ:

- статическое усилие прижатия — до 120 Н;
- контактные вставки из угольных секций графита шириной 50 мм;
- реализация представительных циклов токового нагружения в реальных эксплуатационных условиях (рис. 8), в том числе с предварительным кондиционированием воздуха в вагонах поезда или с длительной стоянкой поезда в зимнее время. Последний цикл является наиболее напряженным, поскольку он предполагает питание поезда от одного токоприемника в течение 20 мин до отправления;
- подвеска с одиночным контактным проводом для случая предварительного кондиционирования воздуха в вагонах поезда на технической станции;
- подвеска со сдвоенным контактным проводом для случая длительной стоянки поезда;
- зигзаг контактного провода равен  $\pm 300$  мм;

• продолжительность испытания составляет, как правило, от 20 до 30 мин.

*Результаты испытаний.* Исследования по методу инфракрасной термографии показали, что у большинства обычных графитовых пластин промышленного изготовления (методом экструзии с последующей металлизацией) имеется тенденция к концентрации тепла, выделяемого по закону Джоуля, непосредственно в точке контакта, где температура достигает 108 °С. В то же время для пластин из графита высокой плотности характерно более равномерное распределение тепла по всей пластине, а температура в точке контакта равна 54 °С (при токе 150 А и усилии прижатия 60 Н).

Это иллюстрирует принципиальные особенности графита высокой плотности, заключающиеся в эффективном «дренировании» тока самим графитом и металлическим основанием.

Из рис. 9 видно, что контактный провод при взаимодействии с контактной вставкой из графита высокой плотности марки SK85Cu, разработанной компанией Hoffmann, при токе 120 А нагревается значительно меньше, чем при взаимодействии с контактной вставкой из близкого по химическому составу графита марки SK85Cu, изготовленного традиционным методом (порошковая амальгама — экструзия — отжиг — металлизация). Такая способность к рассеянию тепловой энергии обеспечивает в реальной эксплуатации токосъем при токе порядка 350 А через две угольные вставки шириной 50 мм, что невозможно при использовании обычных материалов.

На рис. 10 показано, как на стенде определялся максимальный по критерию нагрева ток с использованием одной контактной вставки из графита высокой плотности.

Испытания позволили протестировать 16 материалов на базе графита, насыщенного металлами или

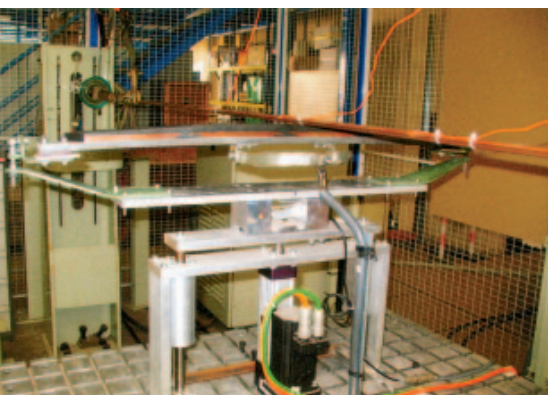


Рис. 7. Стенд для статических испытаний контактного провода и контактных вставок

другими составляющими (смолами и т.п.).

Выполнение этих работ, в которых участвовали как SNCF, так и компании-поставщики, позволило выделить два материала, наиболее полно отвечающих понятию «графит высокой плотности»: композиционный графит компании Mersen и анизотропный графит компании Hoffmann.

### Новые материалы

#### Компания Mersen

В 1999 г. компания Mersen (Франция) предложила новый материал, заимствованный из тормозных технологий, который кардинально отличался от стандартных экструдированных материалов.

Композиция углерод/углерод (код P8389) представляет собой полотно из волокнистой ткани. Базовый материал затем подвергается денсификации (уплотнению) углерода вокруг волокон с последующей термической графитизацией, которая придает ему кристаллическую структуру, близкую к графиту.

Насыщенный медью путем ее инфильтрации под давлением в остаточную пористость, этот материал приобретает отличные характеристики по рассеянию тепловой энергии, полезные при токосъеме как на стоянках (при внутреннем сопротивлении 400 мкОм·см), так и в движении с интенсивностью токосъема 300 А/см. Преимуществом композиционного графита является его хорошая обрабатываемость, а себестоимость зависит от объема производства.

Однако первые испытания с использованием вагона Vulcain показали быстрый износ такого «грубого» материала, что потребовало поиска решений по усилению его износостойкости. Для повышения сопротивляемости абразивному износу компания Mersen, помимо пропитки смолами, предложила

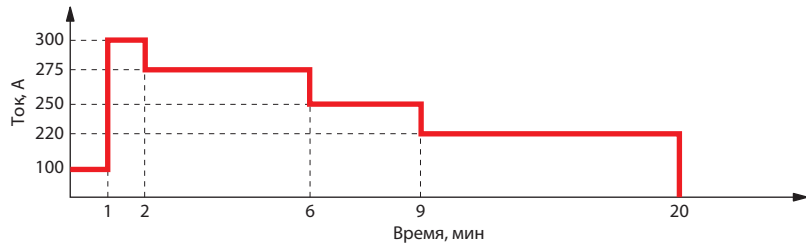


Рис. 8. Типичный режим токового нагружения (трогание поезда после длительной стоянки в зимнее время)

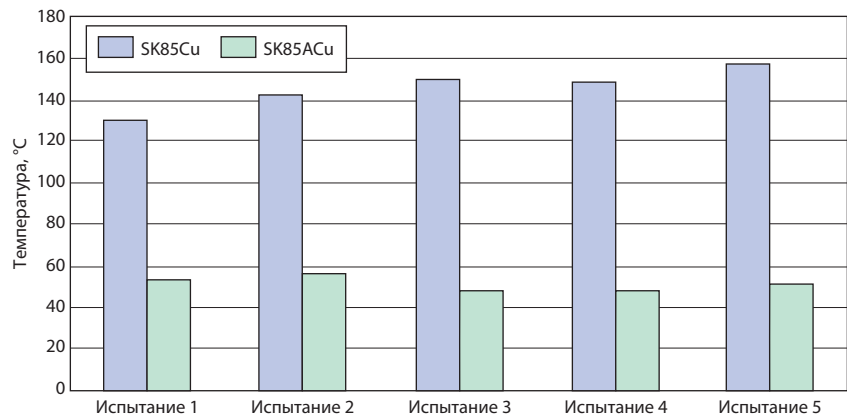


Рис. 9. Нагрев контактного провода при взаимодействии с контактными вставками из графита обычного и высокой плотности

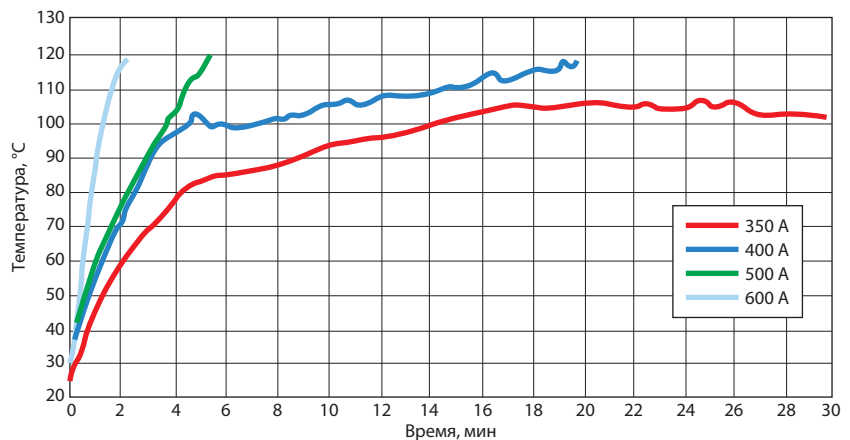


Рис. 10. Зависимость нагрева от силы и длительности тока

вести в конструкцию вставки центральный элемент из экструдированного графита.

В ходе последующих исследований определяли оптимальное соотношение между композиционным и экструдированным графитом для обеспечения нужных технических характеристик при приемлемых затратах.

В результате были разработаны контактные вставки типа Triplex, состоящие из центральной полосы из экструдированного графита марки P 5696 и двух боковых полос из композиционного графита марки P 8389 (рис. 11).

Следует отметить, что токоприемники экспериментального электропоезда V150, который 3 апреля

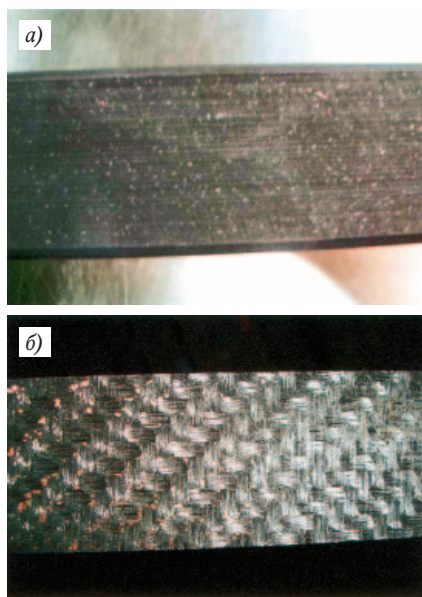


Рис. 11. Полосы из экструдированного (а) и композиционного (б) графита для контактной вставки типа Triplex

2007 г. установил мировой рекорд скорости для железнодорожного транспорта (574,8 км/ч), были оснащены угольными контактными вставками компании Mersen.

#### Компания Hoffmann

Компания Hoffmann (Австрия), входящая в группу Schunk, не искала совершенно новый материал, но тем не менее создала оригинальную марку графита на базе имеющихся стандартных марок (SK85, SK01 и др.).

Специалисты компании установили, что в обычном амальгмированном и экструдированном аморфном углероде может образовываться только случайно распределенная изотропная пористость. После насыщения металлом (металлизации) частицы меди находятся в среде углерода очень далеко друг от друга, и поэтому прохождение тока затруднено, что обуславливает быстрый нагрев материала.

Определенные технологические процессы позволяют обеспечить большую пористость, но в этих случаях медь плохо сцепляется с графитом.

Установив наличие ориентированных микротрещин при изготовлении пластин графита, компания Hoffmann выдвинула идею выделения пластов, в которых имеются естественные прожилки, ориентированные вертикально.

Насыщение медью этих прожилков в объеме 20–30% массы графита обеспечивает естественное прохождение тока от точки соприкосновения контактной вставки с контактным проводом до металлического основания без перегрева, присущего изотропному распределению частиц меди в стандартных материалах.

Такие материалы, получившие название анизотропных, теперь известны под марками SK85ACu, SK01ACu и т. п.

#### Испытания в реальной эксплуатации на электропоездах TGV

Контактными вставками из двух материалов, успешно прошедшими проверку на вагоне Vulcain и на испытательном стенде, были в конце 2003 г. оснащены токоприемники высокоскоростных электропоездов TGV Atlantique № 317 и 336.

Особое внимание было уделено наблюдению за работой этих четырех модифицированных токоприемников с угольными контактными вставками среди сотен токоприемников других типов с металлическими контактными накладками, установленных на обычных и высокоскоростных электропоездах, а также на электровозах, при обращении на одних и тех же линиях юго-западного направления от Парижа, электрифицированных на постоянном токе 1,5 кВ.

На маршрутах Париж – Тулуза и Париж – Тарб длиной несколько более 600 км имеется контактная подвеска разных типов, в том числе так называемая нормальная с медными проводами (максимальная скорость движения 220 км/ч),

типа MIDI (скорость до 140 км/ч) и высокоскоростная на обходе Тура (скорость до 270 км/ч).

Результаты испытаний были обнадеживающими: хорошее состояние поверхности графита без следов ударных повреждений и темп износа порядка 1 мм/10<sup>3</sup> км, что соответствовало непрерывному пробегу, равному примерно 15 тыс. км, т. е. почти в 2 раза большему, чем средний пробег токоприемников высокоскоростных электропоездов TGV с металлическими контактными накладками.

Как видно из рис. 12, за время наблюдения (около 6 лет, с января 2004 по июль 2009 г.) отмечена общая тенденция уменьшения износа контактных вставок, принципиально связанная с постоянным улучшением процесса эксплуатации парка поездов TGV на линии. Явно выраженные пики износа соответствуют зимним месяцам, когда темп износа увеличивается в 3 раза, главным образом из-за обледенения контактной сети.

В конце 2009 г. 147 высокоскоростных электропоездов семейства TGV (в том числе 42 модернизированных поезда TGV PSE и 105 поездов TGV Atlantique) были оснащены токоприемниками с угольными контактными вставками из материалов компаний Mersen и Hoffmann.

К тому времени средний темп износа контактных вставок по сравнению с началом эксперимента снизился на 40%, т. е. до 0,6 мм/10<sup>3</sup> км, что соответствует потенциальному непрерывному пробегу 25 тыс. км (следует напомнить, что речь идет о линиях, электрифицированных на постоянном токе 1,5 кВ).

Следует также иметь в виду, что приведенные данные являются индикатором срока службы токоприемников на линиях постоянного тока, в то время как поезда TGV Atlantique эксплуатируются в основном на линиях переменного тока 25 кВ, 50 Гц (в соотношении 75:25%), на

которых износ контактных вставок гораздо меньше. Поэтому, если потенциальный срок службы токоприемников между заменами контактных вставок в период с 2003 до 2009 г. удвоился, то его надо увеличить еще в 6 раз, т. е. с 20 до 120 дней.

При этом средняя периодичность замены металлических контактных накладок в тех же условиях эксплуатации не превышает 17 дней.

Такая периодичность для пары трения металл/металл является постоянной, тогда как для пары графит/металл она возрастает, особенно когда доля электропоездов, оснащенных токоприемниками с угольными контактными вставками, превышает 50%, как это видно из рис. 13.

В настоящее время 80% токоприемников электроподвижного состава, эксплуатируемого на линии Тур – Бордо, снабжены угольными контактными вставками.

Помимо всего прочего, увеличение срока службы контактных вставок дает значимый экономический эффект за счет снижения стоимости технического обслуживания электропоездов и электропоездов.

Кроме того, в период между 2005 и 2009 г. число токоприемников, снятых для ремонта, сократилось в 6 раз, а длительность ремонта также уменьшилась вследствие упрощения конструкции и устранения некоторых операций. Так, в процессе ремонта ранее приходилось иметь дело с 40 крепежными винтами (теперь – с 12), отпала также необходимость в очистке, обезжиривании и смазывании.

Не следует забывать и об улучшении условий работы контактного провода, но это сказывается не сразу.

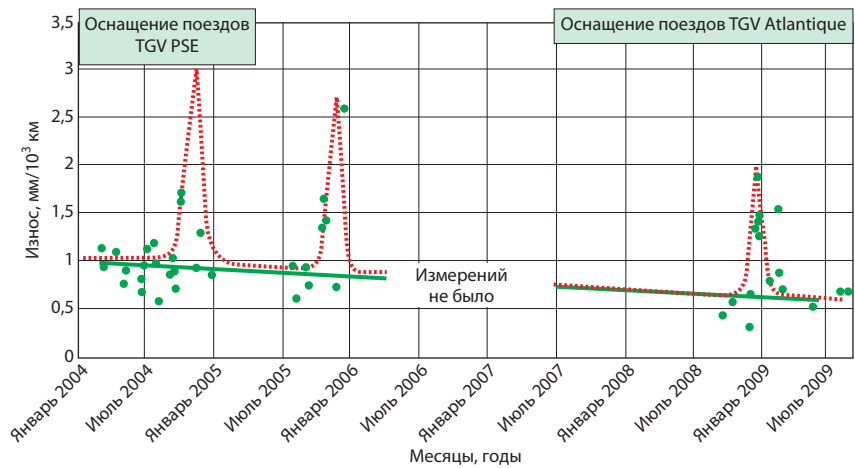


Рис. 12. Темп износа контактных вставок токоприемников

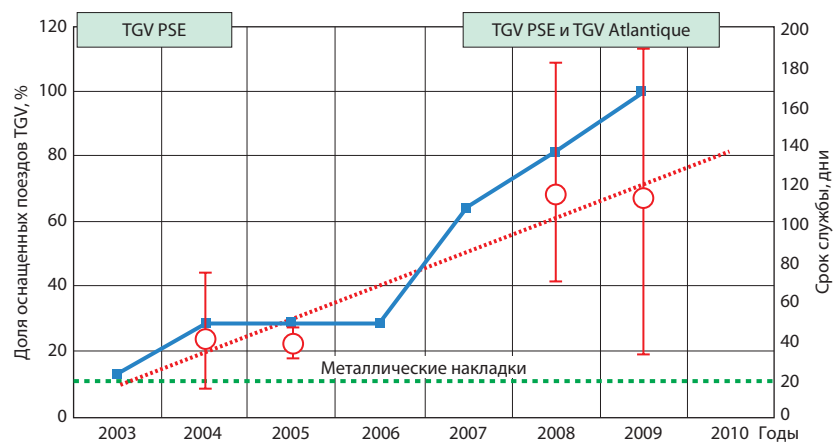


Рис. 13. Срок службы контактных вставок токоприемников

### Заключение

Сотрудничество компаний Mersen и Hoffmann с SNCF было очень продуктивным и позволило предложить новые продукты, также удовлетворяющие требованиям компании инфраструктуры железных дорог Франции RFF об оснащении электроподвижного состава, обращающегося на линиях, электрифицированных на постоянном токе 1,5 кВ, токоприемниками с угольными контактными вставками в целях сокращения затрат на техническое содержание инфраструктуры.

Угольные контактные вставки из графита новых марок целесообразно использовать также на токоприемниках электроподвижного состава городского рельсового транспорта (трамвая и метрополитена), который, как известно, получает питание от контактной сети постоянного тока с еще более низким напряжением (по большей части 750 В), чем на железных дорогах общего пользования.

G. Auditeau. *Revue Générale des Chemins de Fer*, 2010, № 200, p. 9 – 19; материалы компании Mersen ([www.mersen.com](http://www.mersen.com)).