

В. Н. СТАРЧЕНКО, В. А. ГУРИН,
В. П. БЫКАДОРОВ, Е. Н. ШАПРАН

Фрикционные материалы на базе углерод-углеродных и углерод-асбестовых волокон для тормозных устройств

Общей тенденцией развития и совершенствования железнодорожного транспорта является повышение осевой мощности тяговых единиц подвижного состава, увеличение скорости движения, весовой нормы и вместимости поездов.

В системе колесо — рельс в современных условиях технически реальной и экономически оправданной является максимальная скорость, близкая к 350 км/ч. На железных дорогах Франции, Германии и Японии движение поездов осуществляется со скоростью 250 — 320 км/ч при достигнутой максимальной 500 км/ч [1].

В таких условиях особую актуальность приобретает проблема торможения, поскольку необходимо обеспечить безопасность движения и выполнить постоянно возрастающие нормативные требования к величине тормозного пути, времени торможения и допускаемому замедлению.

Энергоемкость и качество торможения определяются в основном непосредственно фрикционным сопряжением тормозная колодка (накладка) — тормозной диск или ходовые колеса тормозных осей подвижного состава.

В тормозных системах применяют различные фрикционные материалы: чугун (серый, перлитный, фосфористый различных модификаций); фрикционные асбополимеры (ФАПМ); композиты и металлокерамику [2 — 6]. Анализ экспериментальных исследований указывает на существенную зависимость основного выходного параметра фрикционного сопряжения, а именно реализуемого коэффициента трения, от удельного давления, скорости скольжения и температуры на контактной поверхности. При этом речь идет как о мгновенных, так и средних значениях этого параметра. Ярко выраженное снижение коэффициента трения чугунных колодок любого типа с ростом скорости движения обуславливает эксплуатационные границы их применения: скорость

до 140 км/ч при осевой нагрузке 210 кН и тормозной мощности на оси не более 450 кВт.

Композиционные колодки из материалов V-BKS типов LL, L, K и K-hoch или ТИИР-300, 303, 308 обычно применяют при скорости движения от 100 до 160 км/ч. Они имеют менее выраженную зависимость коэффициента трения от скорости, но повышенную чувствительность к величине усилия прижатия и наличию влаги.

Опыт эксплуатации электровозов серии S 252 Государственных железных дорог Испании (RENFE), оснащенных тормозами с металлокерамическими тормозными колодками и развивающих максимальную скорость 220 км/ч, показал, что механический тормоз должен включаться только после электрического в диапазоне малой скорости движения и в случаях экстренного торможения. Это требование обусловлено резким увеличением во время торможения термических напряжений (до 500 — 700 Н/мм²) и структурными изменениями материала поверхности катания колеса, выражающимися в появлении сетки поверхностных трещин, которые впоследствии разрастаются, становятся очагами мелкого выкрашивания и способствуют интенсивному изнашиванию поверхности колеса. Предельная тормозная мощность на оси с металлокерамическими колодками может быть увеличена до 650 кВт при условии выполнения указанных требований [3, 4].

Простые и экономичные колодочные тормоза при начальной скорости торможения более 160 км/ч не могут обеспечить требуемой эффективности торможения с нормируемой длиной тормозного пути из-за недостаточной тормозной мощности, которая ограничивается прежде всего разрушающим термическим воздействием на поверхность катания колеса и материал тормозных колодок. Так, при остановочном торможении со скорости 140 км/ч отмечены случаи возгорания колодок уменьшенной длины из фосфористого чугуна, коэффициент теплопроводности которых $\lambda = 21...50$ Вт/(м·К) [4, 5].

Необходимо также отметить, что длительное или экстренное торможение композиционными колодками приводит к местному перегреву контактной поверхности колеса и колодки, имеющей низкую теплопроводность ($\lambda = 1,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$). При этом происходят необратимые структурные преобразования связующего колодок, и при последующих торможениях на поверхности катания колеса появляются риски, задиры и термотрещины [4].

Дальнейшее повышение тормозной мощности на оси (более 800 кВт) оказалось возможным только с применением дисковых тормозов вследствие более высокого теплообмена и отвода тепла в длительном режиме. Однако и в этом случае проблема выбора материалов фрикционного сопряжения остается актуальной в связи со снижением коэффициента трения, вызываемым воздействием высокой температуры в контактной зоне.

К сожалению, влияние на характер изменения коэффициента трения температуры контактной поверхности фрикционного сопряжения, которая является интегральным показателем удельного давления и скорости скольжения в контакте и пропорциональна работе сил трения, изучено недостаточно. В технической литературе приведены лишь отдельные ее численные значения для конкретных условий испытаний.

Авторами предлагается принципиально новый фрикционный материал для тормозных колодок и тормозных накладок в виде углерод-углеродной композиции (УУКМ), разработанной и изготовленной по специальной технологии на основе углеродной матрицы с различными упрочняющими каркасами и последующим газофазным насыщением. Работа выполнена в Восточноукраинском национальном университете имени В. Даля совместно с Национальным научным центром «Харьковский физико-технический институт» и ОАО «Холдинговая компания» Лугансктепловоз.

Экспериментальные исследования опытных образцов проводились на инерционной машине трения [7, 8], реализующей схему «вращающийся шкив — тормозные колодки». Шкив диаметром 200 мм изготовлен из колесной стали. Шероховатость его поверхности соответствовала среднему арифметическому значению отклонений неровностей профиля $R_a = 0,3...0,7 \text{ мкм}$. После каждой серии опытов поверхность шкива восстанавливали до исходных параметров, перед записью которых выполняли приработку фрикционного сопряжения. При этом контактная поверхность трения колодки составляла не менее 80 % номинальной площади контакта.

В качестве выходных параметров, которые регистрировали в процессе торможения, приняты: тормозной момент M_t , частота вращения тормозного шкива n , усилие в замыкающей тяге F_z , усилие сцепления фрикционных поверхностей $F_{сц}$ и температура контактной поверхности по длине колодки t_k .

Электрические сигналы датчиков вначале записывали на магнитный диск ПЭВМ с применением аналого-цифрового преобразователя в виде встроенной платы SDI-ADC14-32F. После эксперимента проводилась автоматическая обработка массивов полученных данных.

Образцы накладок изготавливали с использованием термоградиентных газофазных методов уплотнения пироуглеродом пористых сред [9 – 11].

Предварительно из промышленного графита были изготовлены три оправки-нагревателя в виде колец диаметром $180 \times 200 \text{ мм}$ и длиной 340 мм каждая. В качестве волоконных наполнителей использовали углеродная ткань УРАЛ ТМ-4 (УТ) и асбестовая ткань АТ-2 (АТ). Ленты требуемой длины шириной 340 мм для обеспечения плотной намотки были предварительно замочены в воде с небольшой добавкой клея ПВА (около 2 % объема) в течение 24 ч. После этого ленты наматывали на оправки-нагреватели и плотно укатывали. Плотность намотки мокрых лент УТ и АТ оказалась одинаковой и составила около $0,57 \text{ г/см}^3$, что было близко к плотности при их сухой намотке (около $0,51 \text{ г/см}^3$).

Приведенные величины соответствовали удельному содержанию углеродных и асбестовых волокон (нитей) в конечных материалах после уплотнения их пироуглеродом. Затем в установке пиролиза АГАТ-3,2 заготовки на оправках-нагревателях ставили друг на друга и в потоке природного газа резистивно нагревали до 1000°C . Уплотнение пироуглеродом проводили методом радиально движущейся зоны пиролиза [10 – 11] при скорости движения $0,51 \text{ мм/ч}$. Общая длительность процесса составила около 54 ч.

Полученные кольца разрезали на опытные образцы в виде секторов с внутренним радиусом 100 мм, длиной по дуге 130 мм, шириной 90 мм, толщиной 10 – 20 мм и на чугунной подкладке закрепили на стойке машины трения.

Опытные образцы испытывали совместно с тормозными колодками, изготовленными из следующих материалов:

- серого чугуна с содержанием углерода 3,04 %, марганца 1,34 %, кремния 1,45 %, фосфора 0,082 %, серы 0,089 % (колодка ГОСТ 6921 – 74 производства ОАО «Холдинговая компания» Лугансктепловоз»);

- асболополимерных материалов (ФАПМ): эластичные вальцованные накладки на каучуковом связующем ЭМ-2 (ГОСТ 15960 – 70); Ретинакс Б (ФК-24А); асбестовая лента типа Б; асбестовый композит ТР 9;

- углерод-углеродных композиционных материалов УУКМ (СК-07.04, УТ4-1,2,3) со структурой 2-Д из ткани Урал-ТМ4 на основе вискозных волокон, пропитанных клеем ПВА, уплотненных пироуглеродом с кажущейся плотностью $1,38 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$, открытой пористостью $10 \pm 2 \%$, пикнометрической плотностью $1,55 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$, удельным содержанием

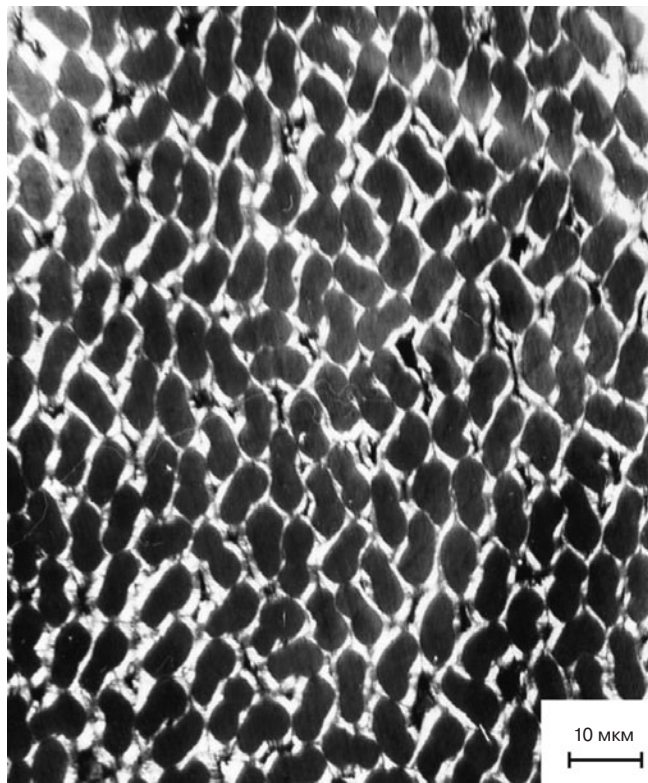


Рис. 1. Структура углерод-углеродного композиционного материала УУКМ

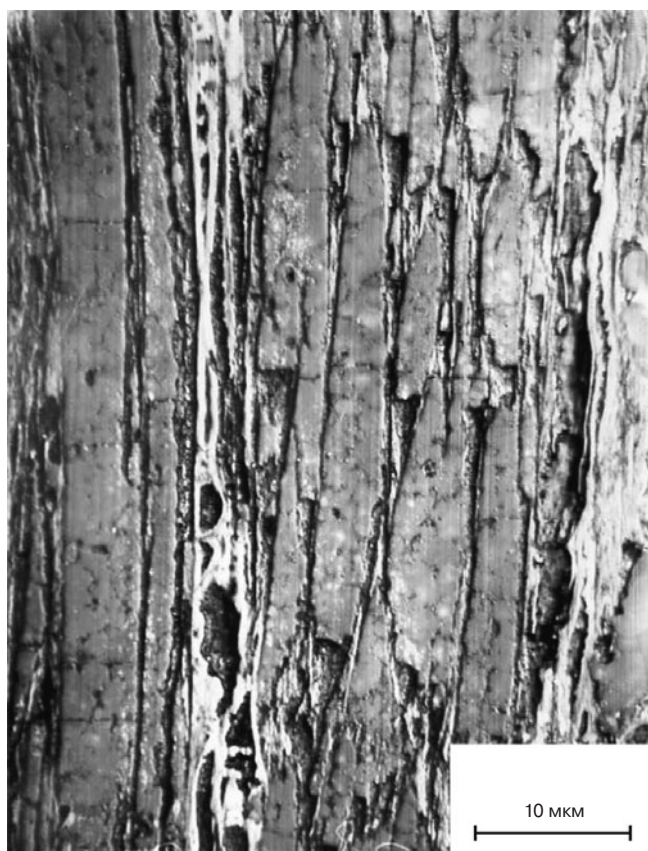


Рис. 2. Структура углерод-асбестового композиционного материала УАКМ

ем углеродного волокна $0,57 \text{ г/см}^3$ и пироуглерода $0,81 \text{ г/см}^3$, а также пределом прочности при сжатии перпендикулярно слоям ткани (поверхности трения) $160 - 200 \text{ МПа}$. Структура этого материала в плоскости трения представлена на рис. 1.

• углерод-асбестовых композиционных материалов УАКМ (АТ-1,2,3) со структурой 2-D из ткани АТ2 на основе асбестовых волокон (горный лен), пропитанных клеем ПВА, уплотненных пироуглеродом с кажущейся плотностью $1,47 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$, открытой пористостью $14 - 16 \%$ и пикнометрической плотностью $1,76 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$. Структура этого материала в плоскости трения представлена на рис. 2.

Испытания всех образцов проводили как сравнительные при идентичных условиях и параметрах нагружения. Время торможения фиксировалось от момента касания колодками тормозного шкива до его полной остановки, причем удельное давление и скорость начала торможения во всех опытах были постоянными и соответственно составляли $0,15 \text{ МПа}$ и $12,6 \text{ м/с}$.

Предварительный разогрев поверхности трения с погрешностью $\pm 5^\circ \text{C}$ выполняли путем многократного подтормаживания. В каждой серии испытаний при установленной температуре проводили не менее 50 опытов.

Результаты этих испытаний приведены на рис. 3, где показан характер изменения коэффициента трения в зависимости от температуры контактной зоны фрикционного сопряжения для различных материалов. Эти зависимости представляют собой математическое ожидание значений коэффициентов трения для принятых интервалов температур.

Испытания показали, что температурную напряженность более 400°C успешно и без каких-либо повреждений материала выдерживали тормозные колодки из серого чугуна и углерод-углеродных композиционных материалов. Углерод-асбестовые композиционные материалы в таком исполнении оказались непригодными для использования в качестве фрикционных.

В сериях опытов с новыми материалами УУКМ не отмечено каких-либо разрушений или повреждений поверхности контртела – шкива из колесной стали. Кроме того, анализ результатов испытаний (см. рис. 3) показал, что коэффициент трения фрикционного сопряжения колесная сталь – УУКМ имеет устойчивую тенденцию роста с увеличением температуры контактной поверхности. При этом рост коэффициента трения начинался при температуре 100°C и достигал своего стабильного значения $\mu = 0,5...0,6$ при температуре 400°C . Необходимо отметить, что при более низких температурах (до 50°C) величина коэффициента трения изменяется в пределах от $0,17$ до $0,28$.

С целью повышения и стабилизации коэффициента трения при низких температурах предложено

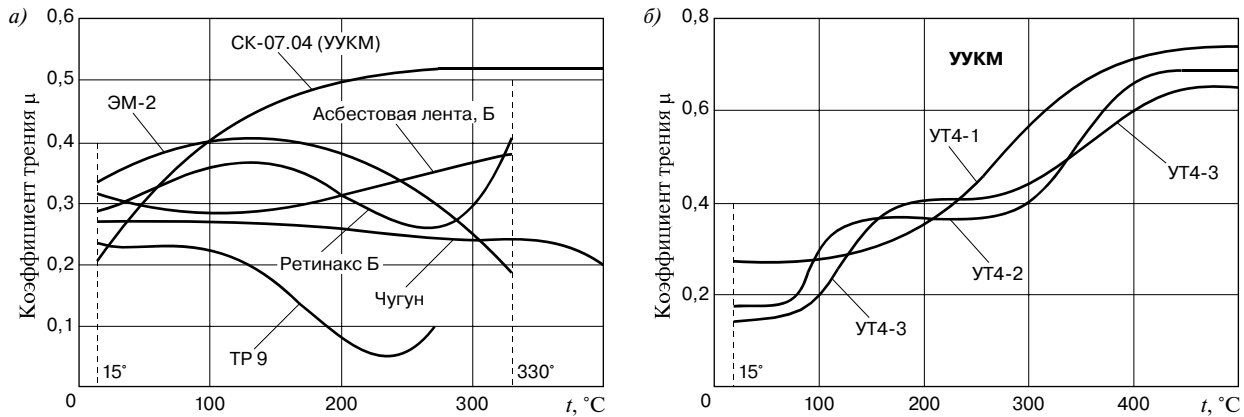


Рис. 3. Результаты испытаний тормозных колодок при удельном давлении 0,15 МПа: а — из серого чугуна и асбополимерных материалов; б — из углерод-углеродных композиционных материалов

выполнить модификацию низкомолекулярных углеродных волокон твердыми мелкозернистыми материалами типа окиси алюминия и карбида бора, а упрочняющий каркас усилить медной проволокой диаметром 0,15 мм.

Результаты испытаний модифицированных образцов УУКМ приведены на рис. 4.

Износостойкость всех опытных образцов определяли по весовому методу — до испытаний и после, а также по специальной программе нагружения в течение 50 ч работы. При этом установлено, что серийные материалы имели примерно равные показатели, а новые значительно превосходили их. Величина износа новых материалов составляла не более 20 % аналогичных показателей серийных.

В процессе испытаний также установлено, что коэффициент теплопроводности новых материалов существенно выше, чем композиционных типа V-BKS и ТИИР, соответственно $\lambda = 1,3$ и $\lambda = 0,8 \dots 3,3$ Вт/(м·К). По оценке разности температур в контакте и с тыльной стороны накладок из УУКМ, а также при соответствующем его перерасчете с учетом каркаса из углеродных волокон коэффи-

циент теплопроводности составил 11 – 70 Вт/(м·К). Для графитов этот показатель при 0 °С равен 174, а при 100 °С — 158 Вт/(м·К) [12].

Значительное снижение температурной напряженности на контактной поверхности и улучшение теплообмена существенно снижают возможность повреждения поверхностей тормозных колес и тормозных колодок. Особенно перспективным представляется использование новых УУКМ для тормозных накладок дисковых тормозов высокоскоростного подвижного состава, у которых температура в контакте достигает 800 – 1000 °С.

Вывод. Новые УУКМ на основе углеродной матрицы, упрочненной каркасом структуры 2-D из углеродных волокон или из ткани на основе вискозных волокон, уплотненных пироуглеродом до плотности 1,36 – 1,38 г/см³, могут быть рекомендованы для использования в качестве фрикционных материалов для транспортных средств.

Испытания подтвердили достаточную их работоспособность, особенно при длительном и экстренном торможении в условиях высокой тепловой напряженности фрикционного сопряжения.

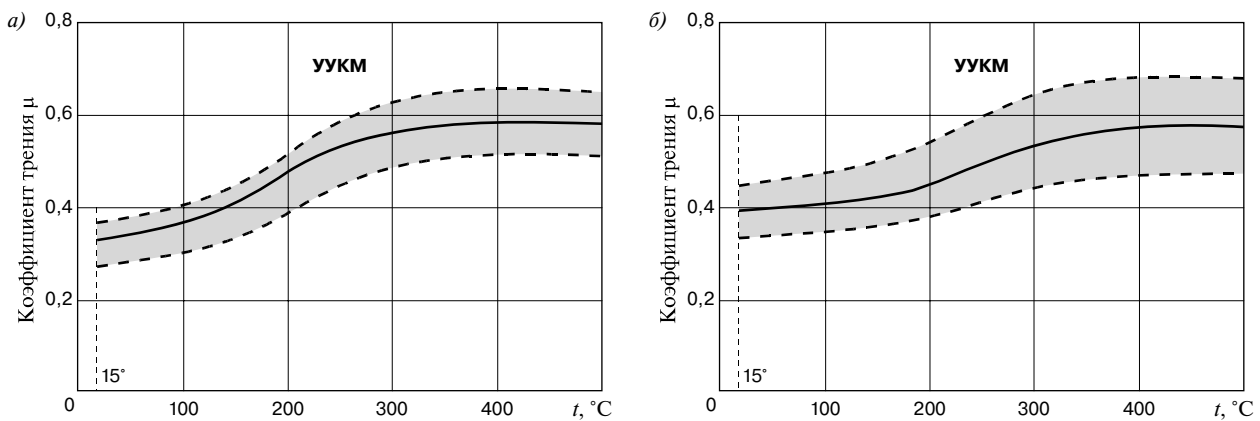


Рис. 4. Результаты испытаний тормозных колодок из модифицированных углерод-углеродных композиционных материалов при давлении 0,15 МПа:

а — УУКМ модифицирован окисью алюминия; б — то же, карбидом бора

В ходе одной из серий испытаний в контактную фрикционную зону попеременно в непрерывном режиме подавали: сухой песок, мокрый песок, воду и песок с осевой смазкой. При всех этих вариантах испытаний колодки на базе новых модифицированных материалов (УУКМ) вели себя совершенно так же, как и колодки чугунные.

В настоящее время созданы необходимые условия для промышленного производства на существующей научно-производственной базе тормозных колодок и накладок для скоростных поездов. Кроме того, намечены пути дальнейшего улучшения трибологических характеристик новых материалов с пироуглеродной матрицей путем использования высокомолекулярных углеродных волокон из полиакрилонитрила с оптимизированной структурой армирования типа 3D, 4D, ..., nD.

Перспективными материалами являются также модифицированные УУКМ с упрочняющим каркасом более изотропной структуры (3-D, 4-D и 4-DL), которые, возможно, позволят получить еще более стабильные значения коэффициентов трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабренц Ф. Сравнение концепций высокоскоростных поездов Европы // Железные дороги мира. 2004. № 9. С. 32 – 38.
2. Тормозные устройства: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 312 с.

3. Zander C.-P. Metal-ceramic braking clamps on powerful locomotives//Glaser's Annalen. 2001. №4. S. 157 – 165.

4. Ehlers H.-R. et. al. Potential and limits of opportunities of the block brake//Glaser's Annalen. 2002. №6/7. S. 290 – 300.

5. Вуколов Л. А., Жаров В. А. Сравнительные характеристики тормозных колодок различных поставщиков// Вестник ВНИИЖТ. 2005. №2. С. 16 – 20.

6. Богданович П. Н., Галай Э. И. Оценка триботехнических характеристик композиционных материалов для тормозных колодок при малых скоростях движения//Вестник ВНИИЖТ. 2005. №2. С. 21 – 24.

7. Старченко В. Н., Полупан Е. В., Шевченко С. И. Повышение эффективности торможения использованием новых углерод-композиционных материалов//Вісник СНУ ім. В. Даля. 2004. №7 (77). Ч. 1. С. 137 – 142.

8. Триботехнические характеристики новых фрикционных материалов для тормозных механизмов транспортных машин /В. Н. Старченко, В. А. Гурин, Е. В. Полупан, И. В. Гурин // Вісник СНУ ім. В. Даля. 2005. №8 (90). Ч. 1. С. 121 – 126.

9. Гурин В. А., Зеленский В. Ф. Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов. Харьков: ВАНТ, 1999. (Серия ФРП, вып. 4/76). С. 13 – 31.

10. Гурин В. А., Гурин И. В., Фурсов С. Г. Исследования газофазного уплотнения пироуглеродом пористых сред методом радиально движущейся зоны пиролиза. Харьков: ВАНТ. 1999. (Серия ФРП, вып. 4/76). С. 32 – 45.

11. Reserch on the development of gasphase methods for carbon-carbon items manufacturing /V. A. Gurin, I. V. Gurin, Y. E. Murin, V. V. Kolosenko /24th Biennial Conference on Carbon 11 – 16 July 1999. Carbon'99, vol. II. P. 662 – 663.

12. Беляев Н. М. Основы теплопередачи: Учебник. Киев.: Выща шк., 1989. 343 с.

АЛСН на городской железной дороге Мюнхена

Для сокращения межпоездных интервалов на Общей линии городской железной дороги Мюнхена между станциями Пасинг и Мюнхен-Восточный 12 декабря 2004 г. внедрена система автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) LZB. При этом потребовалось доработать систему LZB, используемую на железных дорогах Германии (DBAG) в рамках проекта CIR-ELKE II. Одновременно на линии были внедрены современные устройства управления и обеспечения безопасности, в частности система микропроцессорной централизации (см. «ЖДМ», 2005, № 10, с. 61 – 63).

Городская железная дорога играет значительную роль в транспортном обслуживании Мюнхена и его окрестностей. В последние годы возникла острая необходимость в улучшении качественных и количественных показателей ее работы.

Еще в 1991 г. министерство транспорта Германии поставило перед правлением железных дорог страны задачу повысить пропускную способность городской железной дороги Мюнхена за счет оборудования Общей линии и подвижного состава системой АЛСН LZB. Для решения этой задачи были сформулированы эксплуатационные целевые требования, предусматривавшие сокращение межпоездных интервалов на трех основных линиях до 10 мин, следствием чего является увеличение размеров движения поездов на участке Общей линии между станциями Пасинг и Мюнхен-Восточный с 24 до 30 пар поездов/ч.

С самого начала было ясно, что для достижения этих целей необходимо полное обновление устройств СЦБ. Рассматривались следующие варианты:

- сохранение существующей релейной техники с внедрением европейской системы управления движением поездов ETCS или АЛСН LZB;