

Введение Первая в мире подземная железная дорога, движение на которой было открыто 10 января 1863 г, появилась в Лондоне. Первую ее линию возводила компания Метрополитен (в переводе - Столичный). Изначально строительство метрополитена осуществлялось открытым способом. Но уже в 1870 г., по проекту инженера Берлоу, был построен первый участок, сооруженный закрытым способом ведения работ. Для проходки тоннеля здесь был применен буровой щит цилиндрической формы, с обделкой из чугунных тубингов, собранных на резьбовых соединениях. Тубинги получили свое название от слова «туб» (труба). Цилиндрическая форма туннелепроходческих щитов, созданных в те времена инженером Грейтхедом, и сегодня широко применяется в различных щитовых модификациях при проходке тоннелей глубокого заложения. Первые попытки использовать тубинги из железобетона были предприняты только в конце 40-х годов 20 века. Практика показала, что при отсутствии гидростатического давления грунтовых вод они успешно заменяли дорогостоящий чугун. По мере совершенствования технологии бетона область применения железобетонной обделки неуклонно возрастала. На сегодняшний день бетон, применяемый для изготовления железобетонных тубингов, имеет показатель водонепроницаемости более W16, что позволяет использовать его в обводненных грунтах при высоте напора более 100 м. Одним из слабых участков сборной конструкции тоннелей является место стыка между тубингами. В случае применения чугунных тубингов стыки зачеканиваются свинцом, стыки железобетонных тубингов торкретируются раствором на основе безусадочного цемента или зачеканиваются специальными составами. Традиционно в качестве таких материалов используются быстросхватывающаяся уплотняющая смесь (БУС) или быстросхватывающийся расширяющийся цемент (БРЦ) на основе гипсоглиноземистых расширяющихся цементов. В 2010 году на Международной конференции, организованной Российской и Международной ассоциациями тоннелестроения, изучался опыт применения инновационных технологий в тоннелестроении. Было отмечено, что на сегодняшний день вопрос герметизации стыков железобетонной обделки, является наиболее актуальным. После проведения гидроизоляции на опытных участках тоннеля Московского метро с применением различных гидроизоляционных систем, специалисты пришли к выводу, что весьма эффективно и с наименьшими затратами данную задачу способны решать интегрально-капиллярные системы. В итоге гидроизоляция швов между тубингами и герметизация болтовых соединений на одной из линий Московского метро была выполнена с помощью материалов Пенекрита и Пенетрона. Но, не смотря на полученные результаты, рассмотренные способы герметизации стыков имеют один существенный недостаток - они не способны длительное время выдерживать динамические воздействия от подвижного состава или подвижки грунтов. Поэтому в стыках тубингов возникают трещины, по которым вода попадает в тоннель. Это

приводит к необходимости постоянного контроля состояния стыков и периодического их ремонта. В конце прошлого века был предложен новый способ герметизации стыков с помощью уплотнительных резиновых прокладок, располагаемых по периметру тубинга. В результате соединения тубингов поверхности прокладок плотно прижимаются друг к другу, образуя водонепроницаемое соединение, которое не боится динамических воздействий, так как резина, в отличие от ранее применяемых материалов, способна упруго деформироваться. Такое уплотнение включается в работу сразу с момента замыкания и не требует дополнительных трудозатрат после монтажа обделки. Требования к водонепроницаемости обделки и к уплотнительным прокладкам В настоящее время протяженность перегонных тоннелей Казанского метро составляет свыше 34 км. По мнению авторов работы [1] инженерно-геологические и градостроительные условия строительства метрополитена в Казани оказались весьма сложными, так как тоннели и станции располагаются в разнородных глинах и суглинках от твёрдой до мягкопластичной консистенции, разнородных песках от маловлажных до водонасыщенных, в доломитах, доломитовых известняках и песчаниках, а также в разнородных насыпных грунтах и просадочных суглинках твёрдого и полутвёрдого состояния. Кроме того, при строительстве проектировщикам и метростроителям пришлось учитывать тот факт, что уровень грунтовых вод на большем протяжении трассы был расположен выше или чуть ниже верха тоннельных обделок. Поэтому при строительстве было предусмотрено применение искусственного понижения уровня грунтовых вод. Кроме того, для обеспечения длительной безопасности эксплуатации линий Казанского метрополитена при сооружении перегонных тоннелей были впервые в РФ использованы высокоточные железобетонные блоки обделки толщиной 0,25 м, изготовленных из высококачественного бетона класса В45 с гарантированной водонепроницаемостью более W10, разработанного сотрудниками кафедры строительных материалов Казанского государственного архитектурно-строительного университета [2-8]. Одним из условий получения водонепроницаемого и морозостойкого бетона является создание плотной структуры бетона с ограничением величины капиллярной пористости цементного камня, достигаемое использованием низкого В/Ц (не более 0,4), оптимальным расходом цемента, введением добавок. Для обеспечения заданных свойств проектируемого бетона были выбраны два пути: во-первых, вводился полифункциональный модификатор, включающий отечественный суперпластификатор, во-вторых, с целью снижения внутренних напряжений в бетоне, возникающих в процесс его твердения, а также трещинообразования и, как следствие, проницаемости его структуры, производилась оптимизация режимов тепловлажностной обработки и созревания бетонов. Другой ответственной операцией, обеспечивающей герметичность тоннеля метро, является приклеивание к поверхности блоков

обделки уплотнительных резиновых прокладок, предназначенных для герметизации стыков между сборными железобетонными элементами перегонных тоннелей, эксплуатируемых в обводненных грунтах при гидростатическом напоре до 0,3 МПа. Герметизирующие уплотнительные прокладки выполнены в виде замкнутых рамок из специального резинового профиля. Рамки надеваются на сегменты, образующие конструкцию обделки тоннеля и клеиваются на стыковых поверхностях сегментов. При этом часть профиля выступает из паза. В процессе монтажа выступающие поверхности резиновых уплотнителей входят в контакт, обжимаются, образуя водонепроницаемое соединение. В силу своей природы этот шов сохраняет герметичность в процессе деформирования обделки при расчетных гидростатических напорах. Уплотнение включается в работу с момента замыкания и не требует каких-либо дополнительных затрат после монтажа обделки. Обделка кругового очертания собирается из восьми блоков со связями растяжения в стыках и использованием упругих уплотнительных прокладок в стыках для фиксации блоков в поперечном направлении. На начальном этапе строительства перегонных тоннелей Казанского метро партия таких прокладок была поставлена Канадской фирмой «Lovat» на проходку первых 500 м тоннеля. После выдержки блоков на посту дозревания они подвергаются специальной обработке, с целью наклейки резиновых прокладок по контуру изделия. Эта операция включает механическую обработку паза, шлифовку поверхности и наклейку резиновой прокладки по контуру изделия. Для обработки уплотнительного паза на кафедре строительных материалов КазГАСУ были разработаны новые составы грунтовок и шпаклевок, в основу которых входил отечественный, дешевый минеральный кольматирующий компонент [9]. С целью снижения себестоимости монтажа блоков обделки Управлением по строительству метрополитена при администрации города было решено разработать свою отечественную технологию производства аналогичных уплотнительных прокладок, не уступающих зарубежным аналогам по прочности, релаксационным характеристикам и долговечности, на базе ЗАО «Кварт» (г. Казань). Согласно основным требованиям к качеству прокладок [10], сформулированных фирмой «Lovat» и дополненными АО «ЦНИИС» после согласования с Казанским филиалом корпорации «Транстрой», а также изложенных в ТУ 2593-176-05788889-00 [11], материал прокладок должен обеспечивать долгосрочное сопротивление релаксации и после 50-ти лет при температуре 20°C остаточные упругие усилия должны быть выше 70 % от начальных максимальных усилий. Ведомственные строительные нормы ВСН 130-92 [12] допускают герметизацию стыков упругими резиновыми прокладками при сооружении сборной железобетонной обделки, изготавливаемой по ТУ 35-2046-90 [13] при гидростатическом напоре в процессе эксплуатации до 0,35 МПа. Требования к качеству резины изложены в ТУ 38.405721-90 [14], в которых

приводятся основные требования к физико-механическим свойствам и составу резины. Метро является сооружением, имеющим важнейшую хозяйственную значимость. Поэтому к нему предъявляются повышенные требования по долговечности с ориентировочным сроком службы более 100 лет. Долговечность сооружений в свою очередь зависит от долговечности строительных материалов, из которых они изготовлены. Долговечность бетона, например, может контролироваться по показателю морозостойкости. Долговечность же резины в имеющихся нормативных документах [12, 14] никак не контролируется. При строительстве метро в Днепропетровске на отдельных участках была использована технология строительства с применением железобетонных тубингов с резиновыми уплотнителями. Специалистами Украинского НИИ эластомерных материалов и изделий была проведена оценка склонности такой резины к старению. Для этого была определена относительная остаточная деформация после старения резины на воздухе при сжатии на 20 % в течение суток при температуре 70°C. Полученные результаты были приняты как удовлетворительные. Однако прогнозирование изменения свойств резиновых уплотнительных прокладок (остаточных деформаций и величины упругого отпора) на долгосрочный период авторами не производилось.

Экспериментальная часть Строительство метрополитена в Казани, начатое в 1997 году, потребовало значительных затрат на стадии проектирования, так как впервые в РФ устройство тоннелей производилось без оклеечной гидроизоляции. Благодаря усилиям ведущих проектных организаций и предприятий Республики, практически все составляющие тоннельной обделки Казанского метро (бетон, фиксаторы, герметизирующие составы, дюбеля, болты, клей), в том числе и резиновые уплотнительные прокладки производятся на территории Татарстана. Производство резиновых уплотнительных прокладок, поперечное сечение которого представлено на рис. 1, было освоено на ЗАО «Кварт». Запуску линии предшествовал большой объем работ, проведенный совместно с сотрудниками кафедры строительных материалов КГАСУ. Цель этих работ - разработка нормативных требований к характеристикам резиновых прокладок, методов и приспособлений для их испытания и прогнозная оценка долговечности. Наиболее сложной задачей была разработка нормативных требований к характеристикам уплотнительных прокладок, резины для нее и методов определения этих характеристик путем испытания, так как на этот вид продукции регламентирующих документов в РФ не было. Поэтому, при разработке ТУ на новую резину и уплотнительные прокладки, в качестве аналога использовали характеристики аналогичного продукта, поставляемого фирмой «Lovat», а также требований отечественных и зарубежных нормативных документов. В новых ТУ были сформулированы требования к качеству резиновых уплотнительных прокладок, разработаны методики определения основных механических свойств и способы их прогнозирования. В таблице приведены

основные характеристики уплотнительных прокладок. Рис. 1 - Поперечное сечение резиновой уплотнительной прокладки Таблица 1 - Основные характеристики уплотнительных прокладок №№ п/п Наименование контролируемых показателей Требуемые значения

№ п/п	Наименование контролируемых показателей	Требуемые значения
1	Усилие разрыва профиля, кгс	Не менее 200
2	Усилие разрыва углового соединения уплотнительной прокладки, кгс	Не менее 80
3	Относительное удлинение при разрыве, %	Не менее 230
4	Изменение массы профиля после воздействия СЖР-1 при 20°С в течение 72 часов	Не более 15 %
5	Максимальное упругое усилие при полном обжатии (суммарная величина сжатия двух прокладок 2 x 6 = 12 мм)	Не более 40 кН/м
6	Остаточное упругое усилие через 50 лет (при 20°С)	Более 70 % от начального максимального усилия

Оценку механических свойств усложняла конфигурация поперечного сечения уплотнительной прокладки (рис.1). Поэтому при ее испытании, изготавливались специальные приспособления для захвата профиля при определении относительного удлинения и прочности основного сечения (рис. 2), а также прочности углового соединения (рис. 3). Рис. 2 - Приспособление для захвата резины при определении относительного удлинения и прочности основного сечения. Впервые для прогнозирования деформативности и упругого отпора уплотнительных прокладок на кафедре строительных материалов, совместно с сотрудниками кафедры сопротивления материалов была разработана уникальная расчетно-экспериментальная методика. Необходимо отметить, что единственной лабораторией в России, имеющей возможность осуществлять прогнозирование деформативности и упругого отпора уплотнительных прокладок для метро, является лаборатория кафедры строительных материалов КГАСУ. Рис. 3 - Схема крепления уплотнительной прокладки при определении прочности углового соединения. Сущность методики заключается в придании контрольному образцу напряжения, равного 80 % конечного значения обжатия с последующим термоциклированием. Придание проектного напряжения образцу осуществлялось в специальных струбцинах (рис. 4), выполненных в виде двух пластин. Нижняя пластина имеет паз, геометрические размеры которого соответствуют размерам паза в железобетонном блоке тоннельной обделки. С обеих сторон пластин имеются отверстия, в которые устанавливаются болты. Струбцина вместе с обжатым вручную образцом устанавливается между плитами пресса и сжимается до проектного положения, которое контролируется с помощью стального шаблона толщиной 4,2 мм. После достижения заданного зазора, производится запись усилия обжатия образца. Образец фиксируется в проектном положении с помощью гаек, после чего устанавливается на заданный тепловой режим. По три образца выдерживались при температуре 20, 40, 60 и 80°С. Рис. 4 - Струбцины для обжатия уплотнительных прокладок После выдержки образцы извлекались из струбцин и переносились на деревянную подставку. Толщину уплотнительной прокладки определяли в трех точках после упругого восстановления через 30

минут и повторно через 24 часа с момента извлечения образца из струбцины. Затем образцы опять сжимались в струбцинах сначала вручную, а после при помощи пресса до проектного значения. При достижении зазора в 4,2 мм, производилась запись усилия сжатия образца. Замеры остаточной деформации и величины упругого отпора производились после выдержки образцов при заданных тепловых режимах в течение 1, 3, 7, 14 и 28 суток. Для прогнозирования поведения резиновой уплотнительной прокладки использовалась математическая модель вязко-упругого тела: Тогда изменение упругого отпора Поскольку определение изменения упругого отпора в течение продолжительного времени экспериментально не представляется возможным, использовали температурно-временную аналогию. Она основана на предположении, что внутренняя вязкость материала уменьшается при повышении температуры пропорционально некоторому коэффициенту a_T , зависящему только от температуры. Тогда можно предположить, что при температуре T упругий отпор будет в a_T раз меньше, чем при исходной температуре T_0 . При $T = T_0$, $a_T = 1$. Для определения изменения упругого отпора $\Delta\sigma$ через большой промежуток времени вместо реального времени t подставляем t'/a_T . Графический способ позволяет наиболее наглядно спрогнозировать изменение упругого отпора, т.к. предоставляет возможность увеличить временной интервал в сотни, тысячи и более раз. Если $t = t'/a_T$, тогда $t' = t \cdot a_T$. Прологарифмируем указанное соотношение и получим: или Таким образом, если нам известны зависимости изменения упругого отпора $\Delta\sigma$ при различных температурах в зависимости от логарифма времени $\ln t$, получим: Следовательно, чтобы получить величину упругого отпора $\Delta\sigma$ при температуре T_0 для большего временного интервала, надо взять график $\Delta\sigma = f(\ln t)$ при температуре $T > T_0$ и сместить его на $\ln a_T$. (рис. 4). Построенная с помощью таких сдвигов кривая называется обобщенной. На рис. 5 приводятся результаты испытаний исследованных образцов. Рис. 5 - Графический способ прогнозирования изменения упругого отпора Рис. 6 - График прогноза изменения упругого отпора На методику испытания резины уплотнительной прокладки герметизирующих стыков блоков отделки метро разработаны ТУ. Выводы 1. Разработан новый графо-аналитический метод длительного прогнозирования изменения значения упругого отпора уплотнительной резиновой прокладки по температурно-временной аналогии, основанной на предположении, что внутренняя вязкость резины уменьшается при повышении температуры пропорционально некоторому коэффициенту a_T , зависящему только от температуры T , при котором упругий отпор будет в a_T раз меньше, чем при исходной температуре T_0 . При $T = T_0$, $a_T = 1$. 2. Данные кратковременных (28 суток) релаксационных испытаний, позволили методом температурно-временной аналогии спрогнозировать изменение значения упругого отпора уплотнительной резиновой прокладки в возрасте 50 лет и на основании этого предположить, что

остаточные упругие усилия после 50 лет эксплуатации при температуре 20°C составят 71 % от начальных максимальных усилий, что соответствует требованиям и рекомендациям фирмы «Lovat». 3. Результаты кратковременных релаксационных испытаний контрольных образцов показали, что уплотнительные прокладки, выпущенные ЗАО «Кварт», соответствуют по долговечности предъявляемым требованиям и по численным значениям свойств не уступают прокладке поставки фирмы «Lovat». Поэтому они были рекомендованы для использования при производстве высокоточных железобетонных блоков обделки перегонных тоннелей Казанского метрополитена.