Оценка эффективности вибродемпфирующего материала «Teroson WT 129»

И. Пестряков, Э.Гумерова, А. Купчин

Введение

Успешное освоение растущих объемов перевозок невозможно без повышения провозной способности железных дорог, что требует дальнейшего роста технического уровня подвижного состава, внедрения новых высокоэффективных конструкций грузовых и пассажирских вагонов, более интенсивного использования вагонного парка — ускорения оборота вагонов, увеличения скорости движения и массы поездов, повышения статической нагрузки вагона. [1]

Работающие механизмы систем возбуждают в корпусе звуковые вибрации, которые приводят к появлению воздушного шума в различных помещениях. Ходовая вибрация может стать причиной резонансных колебаний, приводящих к неприятному дребезжанию. Причинами возникновения шума также являются стыковка рельсов на железнодорожных путях, вентиляционная и отопительная системы вагонов поездов.

Шум, воздействующий на пассажиров железнодорожных вагонов, относится к непостоянному шуму, колеблющемуся во времени. Это шум, производимый подвижным составом, электрическими и механическими машинами, т.е. на человека действует два вида шума: механический и шум от электрических машин. По ширине спектра может воздействовать как тональный шум (сигнал локомотива), так и широкополосный шум (шум от подвижного состава). Он зависит от следующих факторов:

- тип подвижного состава (проходящий через станцию грузовой транспорт создает большее шумовое воздействие по сравнению с пассажирским);
- техническое состояние подвижного состава (степень износа, качество регулировки систем двигателя и др.);
- тип и качество дорожного полотна и верхнего строения пути;
- скорость движения (при увеличении скорости возрастает шум от качения колес и др.);
- условия эксплуатации (движение с постоянной скоростью, с ускорением, замедлением, длина состава).

Для защиты от воздействий шума осуществляется его ограничение, нормирование и проведение инженерно-технических и организационных мероприятий. Их цель – ограничение уровней звукового давления до приемлемых уровней, при которых воздействие шума не влияет на безопасность жизнедеятельности человека. Среди них – звукоизоляция и звукопоглощение. В целях борьбы с шумом, излучаемым в окружающее пространство поездом, осуществляется применение глушителей шума на вагонах, установках, замена стыкового пути на «бархатный» (бесстыковой), применение резиновых подрельсовых прокладок, ограничение скоростей движения. Для снижения шума внутри подвижного состава проводятся конструкторские мероприятия, связанные с внедрением звукопоглощения в обшивку локомотивов, совершенствованием тормозных и сцепных устройств и др.

Пассажир подвергается действию транспортной вибрации, которая является общей, т.к. приводит к сотрясению всего организма; она возникает вследствие движения подвижного состава**.** При воздействии общей вибрации на организм у людей может проявляться раздражительность, головные боли, ухудшается внимание, память, сон, увеличивается вероятность заболевания неврозами, гипертонией, желудочно-кишечными заболеваниями, язвенной болезнью, стенокардией. Длительное воздействие вибрации на организм человека может вызвать у него виброболезнь. Это тяжелое профессиональное заболевание, которое нередко заканчивается инвалидностью.

Борьба с вредным воздействием вибрации – весьма сложная проблема. Ее эффективное решение может быть достигнуто при участии многих специалистов – конструкторов, медиков, технологов, эксплуатационников.

Основными мерами защиты от вибрации являются:

- требования по ограничению параметров вибрации на рабочем месте до допустимых величин согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96;
- организационно-технические мероприятия, направленные на поддержания технического состояния машин на уровне, предусмотренном нормативно-технической документацией;

• применение средств вибропоглощения и виброизоляции.

Наиболее широкое применение находят такие средства вибропоглощения, как вибропоглощающие покрытия и специальные вибропоглощающие конструкционные материалы. Покрытия (жесткие, армированные, мягкие и др.) наносят на готовые конструкции для возрастания в них потерь энергии при периодических деформациях. Из вибропоглощающих материалов же можно изготовлять конструкции, обладающие высокими диссипативными свойствами и при неимении специальных покрытий. К таким материалам относятся слоеные вибропоглощающие материалы, вибропоглощающие сплавы, стеклопластик. [2]

В настоящей работе было использовано вибродемпфирующее покрытие «Teroson WT 129», предоставляемое компанией ООО «ХенкельРус». Это водная дисперсия на основесинтетической смолы с пламезамедляющими добавками, применяется для снижения вторичных шумов и вибрации, наносится методом распыления либо специальным шпателем. «Teroson WT 129» обладает надежной адгезией к нержавеющей и оцинкованной стали, анодированному алюминию. Поверхности из неоцинкованной стали инеобработанного алюминия требуют предварительного нанесения антикоррозийной защиты (праймера). При нанесении распылением на вертикальные поверхности материал устойчив к провисанию при толщине слоя до 6 мм.

Во время сушки материал не трескается на больших плоскопокрытых поверхностях. В случае, если материал накапливается в бороздках или углах, а также если условия сушки неблагоприятны, например, при отсутствии конвекции, возможно образование микротрещин. Покрытия с «Teroson WT 129» допустимо подвергать воздействию воды. Легкое набухание материала устраняется после высыхания. Отслаивание покрытия от поверхности не произойдет.

«Teroson WT 129» применяется для снижения вторичных шумов и вибрации (шумоизоляция или поглощение конструкционных шумов) на тонколистовых металлических конструкциях при производстве транспортных средств, железнодорожных вагонов, строительстве морских судов, а также при строительстве зданий и оборудования. Данное покрытие применяется в разных типах вагонов и тепловозов в РФ, к примеру, в тепловозе 2ТЭ25КМ на Ломоносовском заводе КМТ (рис.1), а также на БМЗ – Брянском Машиностроительном Заводе (рис.2).

Рисунок 1 – Тепловоз – 2ТЭ25КМ. Нанесение покрытия на внутреннюю поверхность кабины

Рисунок 2 – Применение на БМЗ

Данное покрытие является достаточно новым на российском рынке. Поэтому необходимо знать, какими будут его вибродемпфирующие характеристики для дальнейшего использования покрытия с целью вибропоглощения.

Научная новизна статьи

Темам разработки и создания вибродемпфирующих покрытий были посвящены научные исследования как российских, так и зарубежных учёных. В настоящее время известны следующие фундаментальные труды, в которых изложены основные теоретические закономерности, повлиявшие на дальнейшее развитие науки в направлении борьбы с вибрациями: Нильсен Л. «Механические свойства полимеров и полимерных композиций» (1978 г.), Никифоров А.С. «Вибропоглощение на судах» (1979 г.), А. (и др.) «Демпфирование колебаний» (1988 г.), Иванов Н.И. (и др.) «Техническая акустика транспортных машин» (1992 г.), Соломатов В.И. (и др.) «Вибропоглощающие композиционные материалы» (2001 г.).

Интенсивное развитие техники и технологии в последние два-три десятилетия способствовало ухудшению вибрационного поля, окружающего человека, за счет увеличения мощности и скоростей

существующих и появления новых источников вибраций. [3] Для борьбы с данными вибрациями проводились исследования по созданию вибропоглощающих материалов, отвечающих современным условиям применения. [4]

Несмотря на большое количество работ, посвященных данному вопросу, создание новых высоко демпфирующих покрытий до сих пор остается актуальным. Новизной настоящего исследования является получение экспериментальным методом диссипативных характеристик вибродемпфирующего материала «TerosonWT 129», нанесенного на основу из стали.

Цели и задачи

Целью настоящей работы является сравнительная оценка эффективности данного конструкционного вибропоглощающего материала с ранее известными мастиками.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть средства вибропоглощения.
2. Экспериментальным методом в Испытательно-сертификационном центре «Высота» ИСИ СПбПУ определить динамический модуль упругости $E_Д$ и коэффициент потерь η образцов вибродемпфирующего покрытия, предоставляемого ООО «ХенкельРус».
3. Сравнить полученные характеристики покрытия с приведенными значениями аналогичных вибропоглощающих материалов.
4. Оценить эффективность образцов вибродемпфирующего покрытия «Teroson WT 129» расчетным методом.
5. Выполнить анализ полученных результатов.

Средства вибропоглощения

Основная цель использования средств вибропоглощения – это увеличение с их помощью коэффициентов потерь конструкций, т.е. диссипативной характеристики, определяющей уровни звуковой вибрации конструкции. Отсюда следует, что снижение уровней вибрации зависит от исходного коэффициента потерь. Эффект тем больше, чем меньше коэффициент потерь конструкций до применения вибропоглощающих средств. [5] Измеряемый коэффициент потерь энергии учитывает совместное влияние потерь в соединениях конструктивных элементов (обшивки, перекрытий и т.д.), в конструкциях насыщения корпуса, в тепло- и звукоизоляционных покрытиях [6], потери на излучение энергии в пространство, некомпенсированный расход энергии на контуре конструкции. Потери в соединениях являются существенным фактором диссипации энергии в конструкции. [15-17] Создание однородных конструкционных материалов с большими коэффициентами внутренних потерь считается одним из наиболее перспективных средств вибропоглощения. Данные материалы могут быть как металлические, так и неметаллические, например, стеклопластик, имеющий ряд технологических и эксплуатационных преимуществ перед сталью. Не так давно появились металлические материалы, имеющие большую величину коэффициента потерь [8]. Эффект достигается за счет мелкоячеистой структуры материала, обеспечивающей существенные потери за счет сухого трения, и по причине применения сплавов, в состав которых входят вязкие компоненты [9].

При выборе типа конструкционного материала с точки зрения вибропоглощающих свойств необходимо знать такие физико-механические характеристики, как коэффициент потерь, модуль Юнга и модуль потерь [10,11]. При их определении немаловажное значение имеет соотношение толщин покрывающей мастики и подстилающего слоя покрытия [12]. По исследованиям ряда авторов [13,14], наибольший эффект вибропоглощения достигается при соотношении, равном примерно 3-4.

Сравним физико-механические характеристики вибропоглощающих материалов с характеристиками материала, предоставленного ООО «ХенкельРус», «Teroson WT 129», полученными при его испытании в Испытательно-сертификационном центре «Высота» ИСИ СПбПУ.

Определение динамического модуля упругости прокладочных материалов выполняется по одной из методик в соответствии с ГОСТ 16297. [18] Динамический модуль упругости звукоизоляционных материалов и изделий $E_Д$ определяется на установке, приведенной на рисунке 3, при поперечных колебаниях нагруженного образца по величине частоты колебаний, при которой амплитуда ускорения становится наибольшей (резонанс). $E_Д$ для всех материалов и изделий вычисляется по формуле:

$$E_Д = \frac{4\pi^2}{} \qquad (1)$$

где f – частота резонанса, Гц;
M – масса груза, кг;
h – высота образца под грузом, м;
F – общая площадь одновременно испытываемых образцов, м^2.

При каждом испытании должен быть вычислен коэффициент потерь по формуле (2).

Рисунок 3 - Установка для определения динамического модуля упругости

$$\eta = \frac{1}{\left[\left(\frac{a_2}{a_1}\right) - 1\right]^{0,5}}, \qquad (2)$$

где a_1 - амплитуда ускорения, м/с^2 (или скорости, м/с, или смещения, м) столика вибратора при частоте колебания 5 Гц;

a_2 - амплитуда ускорения, м/с^2, груза (или скорости м/с, или смещения, м) при частоте резонанса f. В нашем случае, частота резонанса имела среднее значение порядка 12 Гц.

Таким образом, значения, полученные по результатам многократных измерений образцов на установке, указаны в таблице 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики вибродемпфирующего покрытия «Teroson WT 129», нанесенного на стальной диск Ø 160 мм толщиной 2 мм.

Толщина покрытия, мм	Коэффициент потерь, η	Динамический модуль упругости, $E_д$, МПа	Модуль потерь, $\eta E_д$, МПа
3,6	0,628	0,096	$6{,}03*10^{-2}$
6,1	0,454	0,103	$4{,}68*10^{-2}$

Сравним полученные свойства данного покрытия с характеристиками остальных вибродемпфирующих покрытий. В настоящее время промышленностью России и зарубежных стран налажен выпуск вибропоглощающих листовых материалов армированного типа.

Мастика «МАВИП» [20] предназначена для создания покрытия для эффективного снижения уровня шума и вибрации конструкций и оборудования (элементы корпуса, фундаменты, трубопроводы и т.д. в судостроении, машиностроении и других отраслях промышленности), а также для повышения их долговечности.

Мастика «ВМЛ-25» [21] содержит поливинилацетатную дисперсию, хлорпарафин, нефелиновый антипирен и графит.

Шумо- и вибропоглощающая мастика «Антивибрит-М» [22] представляет собой густую однородную массу черного цвета, изготовленную на основе эпоксидных смол с целевыми добавками, плотностью 1,6-1,7г/см^3.

Мастика вибропоглощающая ВПМ-1 ("Адем") [23] применяется для защиты от шума и вибрации различных машин, механизмов, металлических строительных конструкций; для демпфирования внутрикорпусных конструкций и помещений: палуб, платформ, переборок, обшивок и ребер жесткости, зашивок, трубопроводов и т.д. в звуковом диапазоне частот.

Материалы с наилучшими вибропоглощающими свойствами представлены в таблице 2. Покрытия испытывались приисполь зовании двух методов (резонансного и реверберационного), как при испытании покрытия на стальной пластине, так и без ее применения.

Таблица 2. Зарубежные и отечественные промышленно выпускаемые вибропоглощающие покрытия.

Название покрытия	Толщина покрытия, мм	Коэффициент потерь, η
«DF-10AL» (Noisebuster, ЗАО «НППТэкникалконсалтинг» г.Тольятти) [19]	5,5	0,4
«LD-17» (Antihpon, Швеция) [24]	2,4	0,17
«Hushmat Ultra» (HushMat, США) [25]	1,5	0,3
«Dynamat Extreme» (Dynamic Control, США) [26]	1,7	0,417
«МАВИП» ("Ярославский судостроительный завод", Ярославль)	5	0,17-0,33
«ВМЛ-25» (ООО «Суперпласт»,Клин)	10	Не определяется (согласно ТУ)
«Антивибрит-5М» (ООО «Суперпласт», Клин)	7	0,25
«ВПМ-1» («Адем») (Санкт-Петербург)	5..6	0,18

Выбрав лучший по коэффициенту потерь материал «Dynamat Extreme» (табл. 2), сравним его с исследуемым материалом «Teroson WT 129».

Таблица 3. Диссипативная характеристика материалов «Dynamat Extreme» и «Teroson WT 129»

Название покрытия	Толщина покрытия, мм	Коэффициент потерь, η
«Dynamat Extreme»	1,7	0,417
«Teroson WT 129»	3,6	0,628

Из таблицы 3 видно, что испытуемое вибродемпфирующее покрытие «Teroson WT 129» несмотря на большую толщину лучше, чем «Dynamat Extreme».

Поскольку коэффициент потерь η однородных тонколистовых стальных конструкций [27-29], на которые наносят покрытие, весьма мал и имеет величину (2-7)*10^{-4}, при применении данного покрытия с большими внутренними потерями увеличиваются внутренние потери энергии корпусных конструкций. Вследствие этого происходит значительное уменьшение вибрации стенок вагонов и тепловозов при движении на высокоскоростных магистралях [30].

Следовательно, данный материал «Teroson WT 129» предназначен для демпфирования стенок вагонов и тепловозов.

Оценка эффективности средств вибропоглощения

При неизменности возмущающих усилий, действующих на гладкую свободную по краям пластину, снижение уровней вибрации ΔN определяется выражением [5]:

$$\frac{\Delta N = 10 \lg \eta_э}{\eta_0}, \qquad (3)$$

где η_0 – коэффициент потерь пластины до нанесения покрытия,

$\eta_э$– коэффициент потерь пластины после нанесения покрытия.

Эффективность покрытия по снижению вибрации определяется отношением коэффициентов потерь пластины после и до нанесения покрытий [31]. Но данное выражение справедливо лишь в том случае, когда колебательная энергия пластины теряется только вследствие внутренних потерь, т.е. $f < f_{кр}$. Это условие описывает подвешенные или защемленные по контуру пластины, в которых расход энергии на контуре отсутствует.

Повторный расчет с учетом изменившихся коэффициентов потерь и других характеристик наиболее полно показывает все изменения уровней вибрации [32]. Эффект демпфирования на низких частотах не приведет к заметному снижению уровней вибрации. На высоких частотах увеличение потерь реализуется в большой степени.

С учетом всех факторов на основании осреднения данных о прохождении и диссипации энергии в [6] была предложена следующая приближенная зависимость, которая определяет снижение уровней вибрации в результате изменения его коэффициента потерь с величины η_0 до величины $\eta_э$:

$$\Delta N = \left(4 + 2\lg\left[\frac{f}{50}\right]\right)\lg\frac{\eta_э}{\eta_0}\sqrt{\frac{500}{f}}, \quad (4)$$

где f –резонансная частота.

В формуле (4) учитывается наблюдаемое в реальных условиях увеличение эффективности покрытий с ростом частоты. При любом способе расчетного определения, эффективность средств вибропоглощения зависит от величины коэффициента потерь конструкции до и после ее демпфирования.

Для вибродемпфирующего покрытия «Teroson WT 129» при частоте резонанса f = 12 Гц:

$$\Delta N = 29 \text{ дБ}$$

Выводы

Нанесение вибропоглощающей мастики является самым действенным средством вибродемпфирования стальных оболочек вагонов и тепловозов. Характеристики нового покрытия «Teroson WT 129», полученные при его испытании в ИСЦ «Высота» ИСИ СПбПУ, выше, чем приведенные физико-механические свойства уже существующих мастик. Оценена эффективность образцов покрытия «Teroson WT 129», которая составила величину снижения уровня вибраций

Таким образом, для снижения вторичных шумов и вибрации на тонколистовых металлических конструкциях при производстве транспортных средств, железнодорожных вагонов рекомендуется использовать вибродемпфирующее покрытие «Teroson WT 129».

Литература

[1] «Железнодорожный транспорт» [Электронный ресурс]. URL: http://www.aswn.ru/. (Дата обращения: 14.03.2016).

[2] Никифоров А.С. Вибропоглощение на судах. Л.:Судостроение. 1979. 11 с.

[3] Galvín P., Domínguez J. Experimental and numerical analyses of vibrations induced by high-speed trains on the CóRDOBA-MáLAGA line. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009. T. 29. No. 4. Pp. 641-657.

[4] Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А. Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь // Функциональные материалы для снижения авиационного шума в салоне и на местности. Сборник докладов конференции. М.: ФГУП ВИАМ, 2015. С. 6.

[5] Никифоров А.С., Будрин С.В. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. Л.: Судостроение.

1968.

[6] Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Фомин Н.Е. Вибропоглощающие композиционные материалы. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2001. 95 с.

[7] Ding D.-Y., Liu W.-N., Gupta S., Lombaert G., Degrande G. Prediction of vibrations induced by trains on line 8 of beijing metro. *Journal of Zhejiang University: Science A*. 2010. T. 11. No. 4. Pp. 280-293.

[8] Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А. Новые вибропоглощающие материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2 (23). С. 51-54.

[9] Schade W. Transport noise: a challenge for sustainable mobility. *International Social Science Journal*. 2003. T. 55. No. 2. Pp. 279-294.

[10] Zhou X.Q., Yu D.Y., Shao X.Y., Zhang S.Q., Wang S. Research and applications of viscoelastic vibration damping materials: a review. *Composite Structures*. 2016. T. 136. Pp. 460-480.

[11] Иванов Н.И. «Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом». М.: Литературное агентство «Университетская книга». 2008. 25 с.

[12] Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А., Долгополов С.С. Влияние армирующего слоя на коэффициент механических потерь вибропоглощающих материалов // Пластические массы. 2015. № 3-4. С. 13-16.

[13] Roma V., Mancarella A., Pantaleo M., Abate G., Pezzoli P. High speed train vibrations along the turin-milan railway and mitigation systems. *Ingegneria Ferroviaria.* 2010. T. 65. No. 5. Pp. 427-445.

[14] Коган А.Я. Аналитическая оценка уровня вибраций пути под проходящими поездами, сформированными из однотипных экипажей // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2013. № 3. С. 3-10.

[15] Бойко Ю.С. Методы снижения шума от высокоскоростных поездов // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов. Сборник трудов пятого международного экологического конгресса (седьмой международной научно-технической конференции). Самара: Самарский научный центр РАН, 2015. С. 43-47.

[16] Yang S.-P., Fang X.-Q., Liu J.-X. Vibration prediction of water-saturated poroelastic ground induced by high speed train with sleeper effect. *Applied Mathematical Modelling.* 2015. T. 39. No. 12. Pp. 3331-3340.

[17] Бородицкий Л.С., Спиридонов В.М. Снижение структурного шума в судовых помещениях. Л.: Судостроение. 1974. 156 с.

[18] ГОСТ 16297 – 80. Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний.

[19] Вибродемпфирующий материал NOISEBUSTER [Электронный ресурс]. URL: http://www.noisebuster-msk.ru/. (Дата обращения: 14.03.2016).

[20] Мастика «Мавип». ТУ 2243-001-26128999-01.

[21] Мастика «ВМЛ-25». ТУ 2068474-296-92.

[22] Мастика «Антивибрит-М». ТУ 6-05-211-1060-89.

[23] Мастика «ВПМ-1» («Адем»). ТУ 2316-412-02068474-2004.

[24] Antiphon® Produkter&Applikationer [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.antiphon.se/noise-reduction/antiphon_ld_engelsk09_id346.pdf. (Дата обращения: 14.03.2016).

[25] HushmatULTRA [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://static.speedwaymotors.com/pdf/Hushmat_Ultra.pdf. (Дата обращения: 14.03.2016).

[26] Stop Vibrating Sheet Metal and Road Noise [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.dynamat.com/technical_specs_dynamat_xtreme.html. (Дата обращения: 14.03.2016).

[27] Huang G., Zhang W., Fu Y., Liang S., Wang X. Stability analysis of parametric vibration for gear transmission system in high-speed train. *Xinan Jiaotong Daxue Xuebao.* 2014. T. 49. No. 6. Pp. 1010-1015.

[28] Дашевский М.А., Мондрус В.Л. Прогноз уровней вибрации зданий от движения поездов метрополитена // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 11. С. 52-54.

[29] Triepaischajonsak N., Thompson D.J., Jones C.J.C., Ryue J., Priest J.A. ground vibration from trains: experimental parameter characterization and validation of a numerical model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* 2011. T. 225. No. 2. Pp. 140-153.

[30] He D., Xiang J., Zeng Q.-Y. Dynamic response analysis of low vibration track subjected to high-speed train. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban).* 2010. T. 41. No. 2. Pp. 770-774.

[31] Forrest J.A., Hunt H.E.M. Ground vibration generated by trains in underground tunnels. *Journal of Sound and Vibration.* 2006. T. 294. No. 4. Pp. 706-736.

[32] Motazedian D., Hunter J.A., Pugin A., Pullan S., Crow H., Sivathayalan S., Khaheshi Banab K. Railway train induced ground vibrations in a low v s soil layer overlying a high v s bedrock in Eastern Canada. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. T. 36. Pp. 1-11.