

УДК: 628.517.4. 699.842
OECD: 2.03 PU

Тонкие пластинчатые сэндвич-конструкции с большим вибропоглощением

Сятковский А.И.¹, Кирпичников В.Ю.², Смольников В.Ю.³, Упоров П.А.^{4*}

¹К.х.н., директор по науке, ОАО «Пластполимер», ²Д.т.н., профессор,

³Инженер 1-ой категории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,

⁴Преподаватель,

^{2,4}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова,

^{1,2,3,4}г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Выполнены экспериментальные исследования акустических свойств тонких пластинчатых металлических сэндвич-конструкций с полимерными слоями на основе ПВА различных толщин, на основе ПВА на бумажном носителе и на основе акрилового каучука СКАН-10. Целью исследований является оценка их вибропоглощающей эффективности в сравнении с однородной стальной пластиной. Измерены спектры входной вибровозбудимости A/F , дБ, в диапазоне 20–1600 Гц и коэффициенты потерь энергии η при ударном возбуждении вибраций. Получено, что все сэндвич-конструкции снижают третьоктавные уровни вибрации в среднем на 11–15 дБ в диапазоне частот от 20 до 1250 Гц относительно стальной пластины. Установлено, что уменьшение толщины слоя ПВА до 0,08 мм приводит к увеличению резонансных уровней A/F всего на ~6 дБ, при $\eta = 0,35$, по сравнению с толщиной слоя 0,57 мм, при $\eta = 0,54$. Выявлено, что уровни резонансных максимумов вибрации конструкции со слоем СКАН-10, при $\eta = 0,12$, имеющего значительно более широкий рабочий температурный диапазон, равный $-50...+50^\circ\text{C}$, по сравнению с ПВА, с рабочим температурным диапазоном $+10...+30^\circ\text{C}$, меньше чем у однородной пластины на 27 дБ. Определена перспективность применения ультратонких слоёв ПВА и СКАН-10 для виброзащиты транспортных средств.

Ключевые слова: тонкие пластинчатые сэндвич-конструкции, вибропоглощающие полимерные слои, уменьшение вибрации пластины, коэффициент потерь, вибропоглощающее покрытие, эффективность вибропоглощения

Thin Plate Sandwich Structures with High Vibration Absorption

Syatkovsky A.I.¹, Kirpichnikov V.Yu.², Smolnikov V.Yu.³, Uporov P.A.^{4*}

¹PhD, Director of Science, JSC 'Plastpolymer', ²DSc, Professor,

³1st category engineer, Krylov State Research Center, ⁴Lecturer,

^{2,4}Baltic State Technical University 'VOENMEH', ^{1,2,3,4}St. Petersburg, Russia

Abstract

Experimental studies of the acoustic properties of thin plate sandwich structures (metal-polymer-metal) with polymer layers based on PVA (of varying thicknesses and on a paper substrate) and SCAN-10 acrylic rubber were conducted. The aim of the study was to evaluate their vibration-absorbing efficiency in comparison with a

*E-mail: uporov_pa@bk.ru (Упоров П.А.)

homogeneous steel plate. The spectra of input vibration excitability (A/F , dB) were measured in the range of 20–1600 Hz and the energy loss coefficients (η) during impact excitation of vibrations. It was found that all sandwich structures reduce vibration levels by an average of 11–15 dB (range 20–1250 Hz) relative to the steel plate. It was found that decreasing the PVA layer thickness to 0.08 mm leads to an increase in A/F levels by only ~ 6 dB (at $\eta = 0.35$) compared to a sample with a thickness of 0.57 mm ($\eta = 0.54$). It was revealed that the SCAN-10 layer ($\eta = 0.12$) ensures a significantly wider operating temperature range ($-50...+50^\circ\text{C}$) compared to PVA ($10...30^\circ\text{C}$). The potential of using ultra-thin PVA and SCAN-10 layers for vibration protection of vehicles has been determined.

Keywords: thin sandwich plate structures, vibration-absorbing polymer layers, plate vibration reduction, loss factor, vibration-absorbing coating, vibration absorption efficiency

Введение

Эффективным способом демпфирования инженерных конструкций является использование в них композитных вибропоглощающих материалов, образованных совокупностью жестких и мягких чередующихся слоев. Внешние жесткие слои, изготовленные из конструкционных материалов, воспринимают силовые воздействия, в то время как мягкие слои из вязкоупругих полимеров обеспечивают диссипацию энергии слоистой структуры. Этот механизм реализуется и в композитных вибропоглощающих материалах с интегрированными вибропоглощающими слоями, в составных металло-полимерных конструкциях, в покрытиях с армирующим слоем [1]. Одним из видов таких материалов являются трехслойные композиты вида металл-полимер-металл (М-П-М), состоящие из двух металлических несущих слоев и обеспечивающего их совместную работу мягкого полимерного слоя. Такие композиты правильнее рассматривать как композитный металлический лист, обладающий существенно большей, по сравнению с листом из аналогичного металла, способностью гасить вибрации [2]–[5].

Для разработки слоистых вибродемпфирующих материалов чрезвычайно важна способность полимерных пленок проявлять высокие вибропоглощающие свойства в очень тонких слоях (толщиной $\leq 0,1$ мм), так как при этом обеспечивается возможность эффективного вибродемпфирования, с одной стороны, и сохраняется достаточно высокий уровень жесткости конструкции, с другой.

Ранее сообщалось о результатах работ по созданию ассортимента (типорядов) отечественных пленочных термопластичных вибропоглощающих материалов со сверхвысокими диссипативными (СВД) свойствами на основе пластифицированного поливинилацетата [6]. Этот пленочный материал прекрасно зарекомендовал себя при работе в вибропоглощающих покрытиях с армированным слоем [7], а в данной работе исследовалась возможность его использования в М-П-М композитах.

Помимо пленок из ПВА, приготовленных по стандартной экструзионной технологии, нами исследовался образец пленки ВПС-2,5, полученный пропиткой соответствующим раствором листов технической бумаги плотностью 60 кг/м³.

Другим, безусловно перспективным направлением является разработка неметаллических композиционных слоистых вибродемпфирующих материалов с интегрированными вибропоглощающими слоями [8].

Несмотря на чрезвычайно высокие коэффициенты механических потерь, пластифицированные пленки из ПВА имеют ряд недостатков:

- низкая температуростойкость (температура переработки ≤ 120 – 130°C)
- наличие пластификатора, который способен мигрировать в ходе отверждения

во внешние слои, нарушая процесс формирования композитной матрицы [9].

Эти недостатки существенно препятствуют возможности применения плёнок из ПВА в качестве вязкоэластического слоя в составе многослойных композитных материалов, получаемых путем термического формования [8]-[10]. В этом плане альтернативой пленок из ПВА могли бы служить полимерные пленки на основе полиакрилатов различного строения. В данной работе исследованы свойства М-П-М композита, содержащего в качестве внутреннего слоя пленку из полимера СКАН-10, представляющего собой сополимер бутилакрилата с 10 % массы акрилонитрила [11].

1 Материалы и методика эксперимента

Были испытаны пять трехслойных пластинчатых сэндвич-конструкций, состоящих из двух стальных пластин толщиной 0,6 мм с промежуточным слоем стандартной полимерной пленки типа ВПС-2,5 на основе поливинилацетата толщиной 0,57, 0,17 и 0,08 мм, той же пленки на бумажном носителе общей толщиной 0,19 мм и вибропоглощающего материала из акрилового каучука типа СКАН-10 толщиной 0,1 мм. Рабочий диапазон наибольших значений коэффициента потерь η колебательной энергии всех вариантов пленки ВПС-2,5 находится в диапазоне температур примерно от 10 до 30°C, а вибропоглощающего материала типа СКАН-10 – от -50 до +50°C.

Выполнялось сопоставление вибрационных характеристик сэндвич-конструкций и имеющей примерно такую же массу однородной стальной пластины толщиной 1,2 мм. Размеры конструкций и пластины в плане равнялись 0,54×0,4 м.

Испытания вертикально висящих на кране образцов проводились при возбуждении одной из их поверхностей малогабаритным вибромолотком с датчиком измерений возбуждающей силы.

Измерялись спектры входной вибровозбудимости в четырех точках возбуждаемой поверхности и спектры переходной вибровозбудимости в точках, находящихся на другой свободной поверхности напротив точек возбуждения. Точки измерения находились в геометрическом центре (ГЦ) образцов, а также на одинаковом расстоянии от ГЦ до их кромок и одного из углов.

Под входной (переходной) вибровозбудимостью A/F , дБ подразумевается величина

$$20 \lg \left(\frac{AF_0}{\alpha_0 F} \right) \quad (1)$$

где A – уровень виброускорения, м/с², образцов при действии силы F , Н; α_0 – пороговый уровень виброускорения, 10⁻⁶ м/с²; $F_0 = 1$ Н.

2 Результаты и их анализ

Измерениями было установлено, что уровни входной вибровозбудимости в каждой точке возбуждения отличаются от уровней переходной вибровозбудимости в находящейся напротив нее точке не более, чем на погрешность вибрационных измерений. С учетом этого дальнейший анализ выполняется с использованием лишь спектров входной вибровозбудимости образцов.

На рисунках 1–4 изображены соответственно следующие узкополосные ($\Delta f = 1$ Гц) спектры A/F , измеренные в ГЦ образцов в частотном диапазоне от 20 до 1600 Гц:

- однородной пластины (кривая 1) и сэндвич-конструкции с полимерной пленкой толщиной 0,57 мм (кривая 2);
- сэндвич-конструкций с толщиной полимерной пленки 0,57 мм (кривая 1), 0,17 мм (кривая 2) и 0,08 мм (кривая 3);

- сэндвич-конструкций с полимерной пленкой толщиной 0,17 мм (кривая 1) и с пленкой из того же материала на бумажном носителе (кривая 2);
- однородной пластины (кривая 1), а также сэндвич-конструкций с супертонкой (0,08 мм) полимерной пленкой (кривая 2) и с вибропоглощающим материалом СКАН-10 толщиной 0,1 мм (кривая 3).

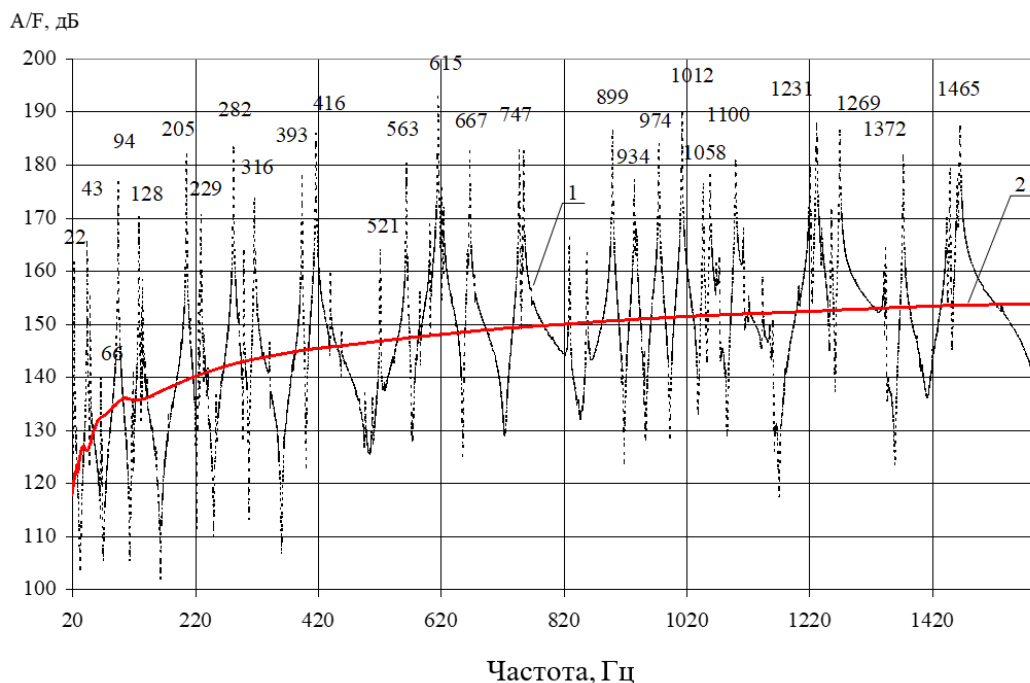


Рисунок 1 – Узкополосные спектры входной вибровозбудимости однородной пластины (1) и сэндвич-конструкции с полимерной пленкой толщиной 0,57 мм (2)

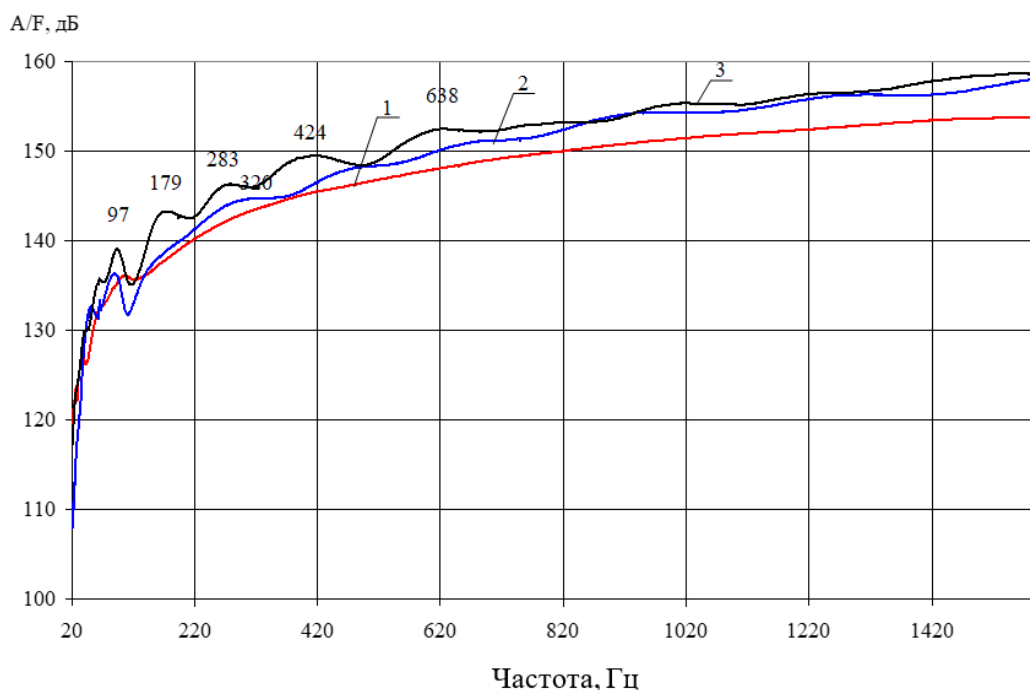


Рисунок 2 – Узкополосные спектры входной вибровозбудимости сэндвич-конструкций с полимерной пленкой толщиной 0,57 мм (1), 0,17 мм (2) и 0,08 мм (3)

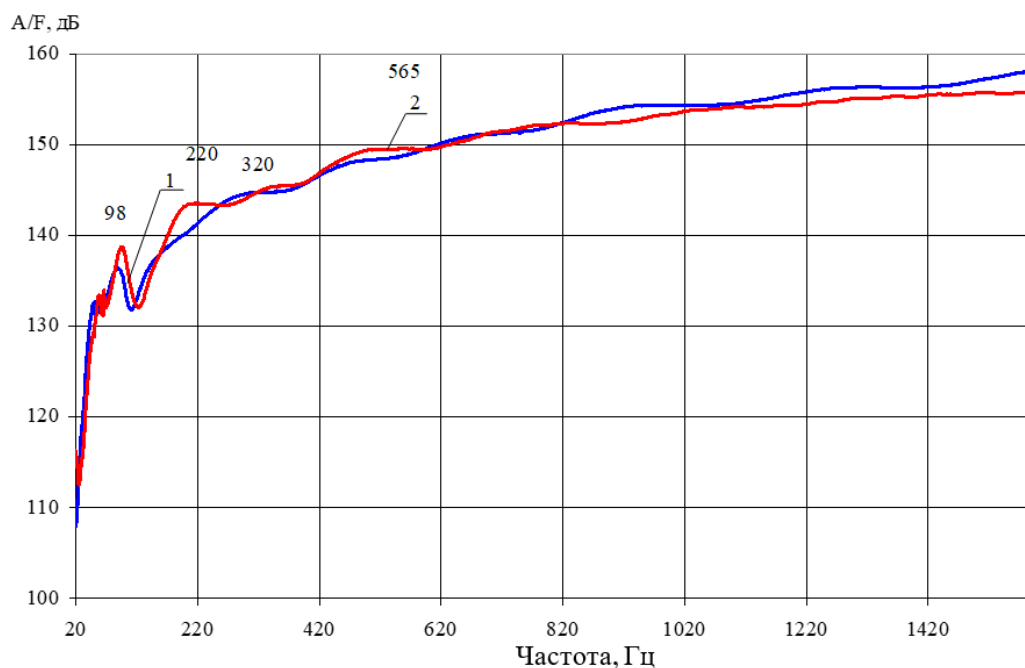


Рисунок 3 – Узкополосные спектры входной вибровозбудимости сэндвич-конструкций с полимерной пленкой толщиной 0,17 мм (1) и с пленкой из того же материала на бумажном носителе (2)

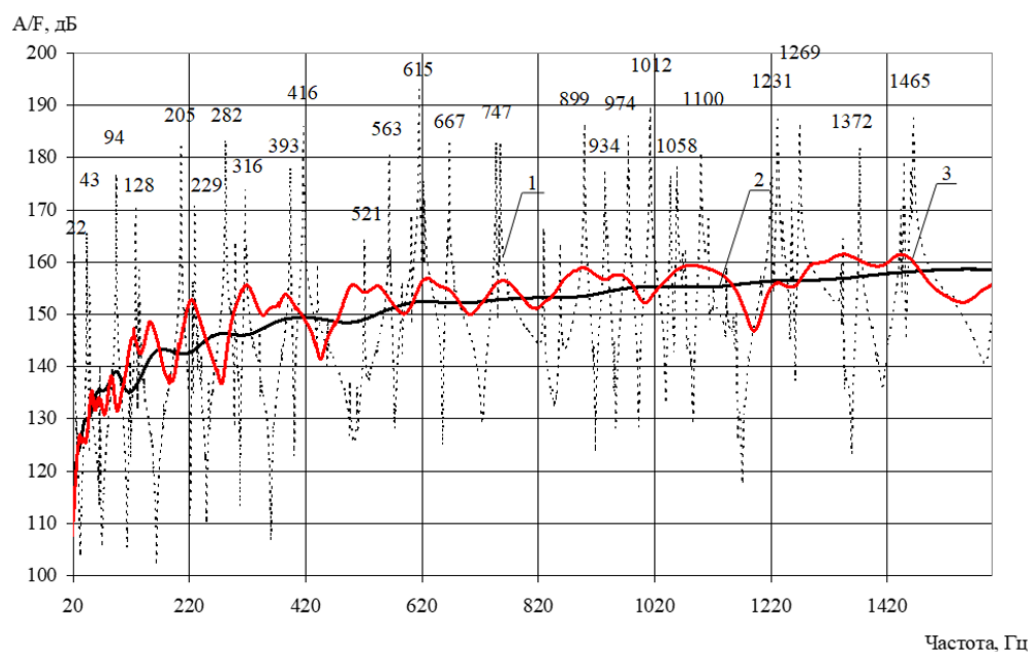


Рисунок 4 – Узкополосные спектры входной вибровозбудимости однородной пластины (1), а также сэндвич-конструкций с супертонкой (0,08 мм) полимерной пленкой (2) и с вибропоглощающим материалом СКАН-10 (3)

Сравнение приведенных и измеренных в других точках возбуждения узкополосных спектров входной вибровозбудимости однородной пластины и сэндвич-конструкций позволило сделать следующие выводы:

– вибрационные характеристики сэндвич-конструкций много лучше характеристик однородной стальной пластины; так, при примерно тридцати острых резонансных максимумах в приведенном спектре входной вибровозбудимости однородной пластины в вибрационных спектрах сэндвич-конструкций либо содержится лишь один или несколько

широкополосных максимумов с существенно более низкими уровнями (рисунки 2–3), либо резонансные максимумы в спектрах вообще отсутствуют (рисунок 1);

- уровни резонансных максимумов в спектре однородной пластины в среднем по частоте больше уровней A/F сэндвич-конструкции с полимерной пленкой толщиной 0,57 мм примерно на 34 дБ (рисунок 1);

- уменьшение толщины полимерной пленки к значительному ухудшению вибрационных характеристик сэндвич-конструкций не приводит; узкополосные уровни входной вибровозбудимости конструкции с супертонкой полимерной пленкой (0,08 мм) больше, чем соответствующие уровни конструкции с пленкой толщиной 0,57 мм, в среднем по частоте всего примерно на 6 дБ (рисунок 2);

- узкополосные спектры входной вибровозбудимости сэндвич-конструкций с полимерной пленкой толщиной 0,17 мм и с пленкой из того же материала на бумажном носителе ($h = 0,19$ мм) отличаются не более чем на погрешность вибрационных измерений (рисунок 3);

- уровни двенадцати резонансных максимумов в узкополосных спектрах входной вибровозбудимости сэндвич-конструкции с вибропоглощающим материалом СКАН-10 в среднем по частоте превосходят примерно на 8 дБ уровни A/F конструкции с супертонкой пленкой и меньше уровней максимумов A/F однородной пластины примерно на 27 дБ (рисунок 4).

Практически такие же соотношения узкополосных уровней входной вибровозбудимости испытанных образцов были получены при анализе результатов измерений A/F , выполненных в других точках.

С использованием приведенных узкополосных спектров были определены средние по резонансным максимумам величины коэффициента потерь η колебательной энергии в образцах.

Величина η на резонансных частотах f_p вычислялась с использованием формулы

$$\eta = \frac{\Delta f_p}{f_p}, \quad (2)$$

где Δf_p – ширина резонансного максимума на уровне -3 дБ от его наибольшего значения.

Экспериментально-расчетные величины коэффициента потерь η колебательной энергии испытанных образцов оказались следующими:

- однородная пластина – примерно 0,001;
- сэндвич-конструкция с толщиной пленки 0,57 мм – 0,54;
- сэндвич-конструкция с толщиной пленки 0,17 мм – 0,39;
- сэндвич-конструкция с толщиной пленки 0,08 мм – 0,35;
- сэндвич-конструкция с пленкой на бумажной основе – 0,35;
- сэндвич-конструкция на основе материала СКАН-10 – 0,12.

Следствием существенно больших потерь колебательной энергии в сэндвич-конструкциях на резонансных частотах явились преимущественно более низкие третьоктавные уровни их входной вибровозбудимости в сравнении с соответствующими уровнями однородной стальной пластины.

Частотные зависимости превышения третьоктавных уровней входной вибровозбудимости A/F , дБ, однородной пластины над третьоктавными уровнями A/F , дБ, сэндвич-конструкций определялись с использованием рисунков 5 и 6.

Средние по полосам от 20 до 1250 Гц величины превышения A/F , дБ, пластины над A/F , дБ, сэндвич-конструкций с толщиной полимерной пленки 0,57, 0,17 и 0,08 мм,

а также с пленкой на бумажном носителе и с материалом СКАН-10 оказались равными 15, 14, 12, 15 и 11 дБ соответственно. (Малая или отрицательная эффективность сэндвич-конструкций зарегистрирована в третьоктавных полосах, содержащих антирезонансные частоты изгибных колебаний однородной пластины с очень низкими уровнями A/F , дБ.)

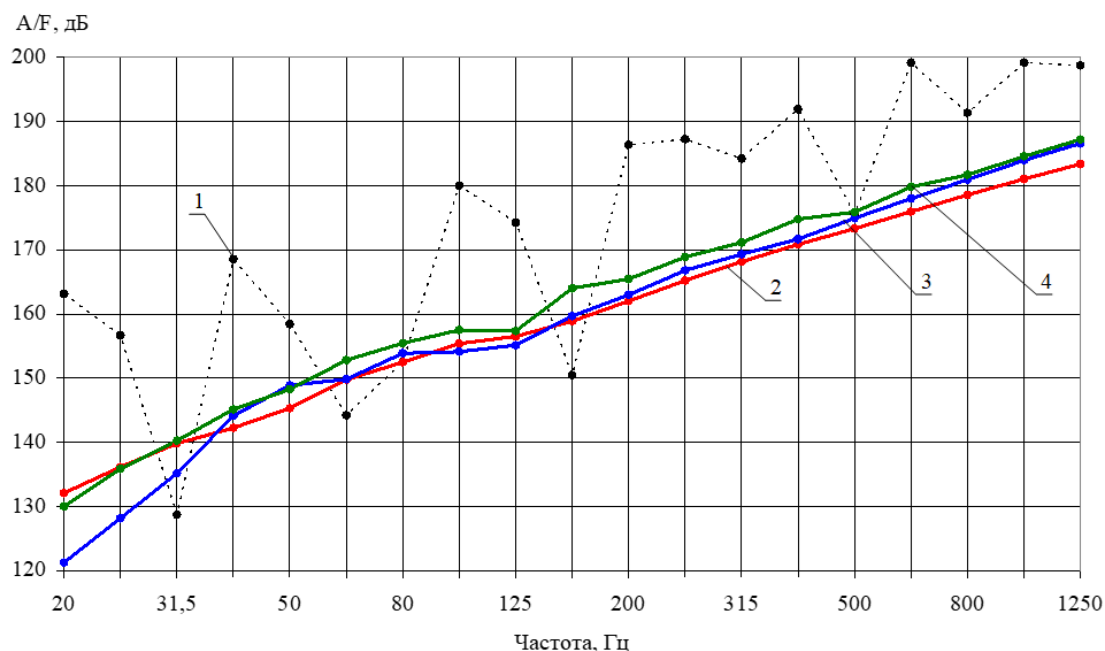


Рисунок 5 – Третьоктавные спектры входной вибровозбудимости однородной пластины (1) и сэндвич-конструкций с полимерной пленкой толщиной 0,57 мм (2), 0,17 мм (3) и 0,08 мм (4)

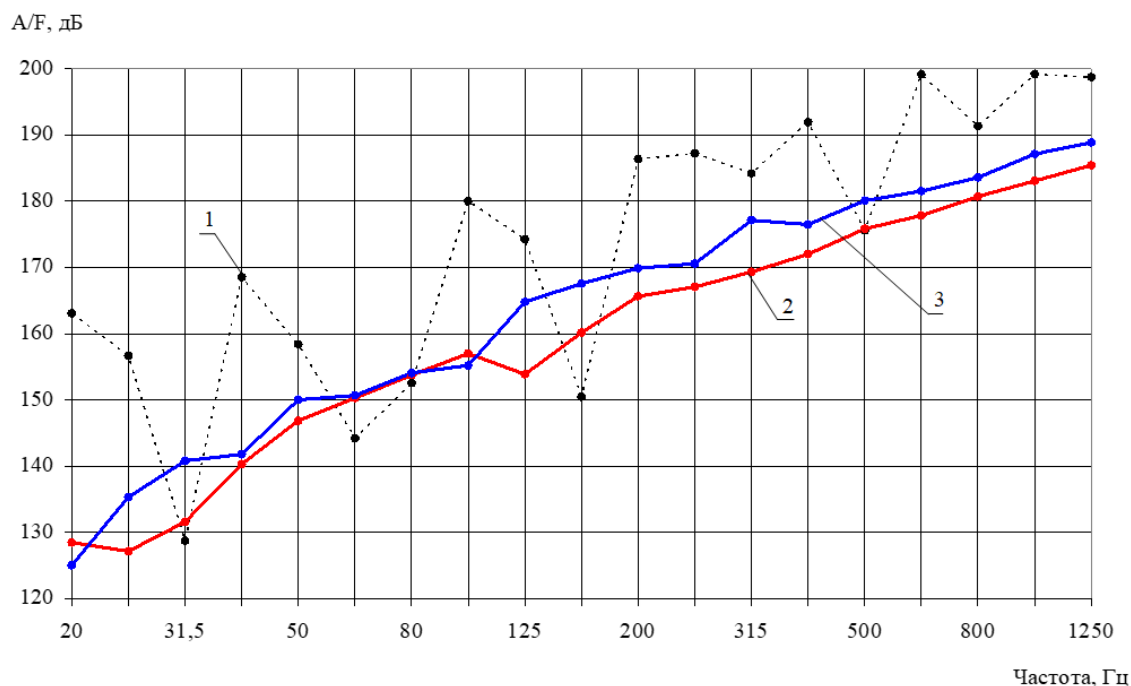


Рисунок 6 – Третьоктавные спектры входной вибровозбудимости однородной пластины (1), а также сэндвич-конструкций на бумажном носителе (2) и с вибропоглощающим материалом СКАН-10 (3)

Заклучение

Проведенные экспериментальные исследования акустических свойств тонких пластинчатых сэндвич-конструкций типа металл-полимер-металл (М-П-М) подтвердили их высокую эффективность в снижении вибрации. Все испытанные образцы, включая варианты со слоями ПВА (толщиной 0,08–0,57 мм) и акрилового каучука СКАН-10 (0,1 мм), продемонстрировали значительное преимущество перед однородной стальной пластиной: среднее снижение третьоктавных уровней вибровозбудимости (A/F) достигло 11–15 дБ в диапазоне 20–1250 Гц. Особенно важно, что уменьшение толщины полимерного слоя до ультратонких значений (0,08 мм) не привело к существенной потере демпфирующих свойств – рост уровней A/F составил лишь ~6 дБ, а коэффициент потерь энергии $\eta = 0,35$. При этом материал СКАН-10 расширил рабочий температурный диапазон до $-50...+50^{\circ}\text{C}$, что в 5 раз превосходит возможности традиционного ПВА ($+10...+30^{\circ}\text{C}$).

Поставленные задачи решены в полном объеме: проведен сравнительный анализ пяти конфигураций сэндвичей, установлена зависимость эффективности от толщины и типа полимерного слоя, а также определены точные значения η (от 0,12 для СКАН-10 до 0,54 для ПВА толщиной 0,57 мм). На основе этих результатов разработаны практические рекомендации: для типовых условий (комнатная температура) целесообразно применение сверхтонких слоёв ПВА ($\geq 0,08$ мм), минимизирующих массу конструкции, а для экстремальных климатических нагрузок – внедрение СКАН-10. Данные решения особенно актуальны для корпусных элементов транспортных средств (судов, вагонов, авиатехники), где снижение вибрации напрямую влияет на долговечность и комфорт.

Оценка технико-экономической эффективности показала, что использование тонкослойных материалов (особенно на основе ПВА с толщиной меньше 0,1 мм) сокращает расход полимера на 30–50% без ущерба для функциональности, что снижает себестоимость. Широкотемпературный СКАН-10 дополнительно устраняет затраты на термостабилизацию. Внедрение этих решений обеспечит экономию за счёт увеличения срока службы оборудования и уменьшения затрат на дополнительную шумоизоляцию.

Научно-технический уровень работы подтверждается её новизной, была доказана эффективность полимерных слоёв толщиной $\leq 0,1$ мм. Расширение температурного диапазона демпфирования с помощью СКАН-10 является значимым шагом в сравнении с аналогами, а результаты соответствуют современным тенденциям в разработке композитных материалов. Таким образом, предложенные решения обладают высоким потенциалом для внедрения в транспортной отрасли, сочетая технологическую осуществимость, экономическую целесообразность и научную обоснованность.

Приведенные в статье результаты могут быть использованы при оценке уровней вибрации и шумоизлучения корпусных и внутрикорпусных сэндвич-конструкций различного рода транспортных средств и инженерных изделий.

Список использованных источников

1. Crocker M.J. Handbook of Noise and Vibration Control. - John Wiley & Sons, Inc, 2007. - 1569 p. - ISBN 978-0-471-39599-7.
2. NIPPON STEEL Corporation [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.nipponsteel.com>. (Дата обращения 24.02.2025)
3. Roush Enterprises [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.roush.com>. (Дата обращения 24.02.2025)

4. Antiphon AB [Электронный ресурс]. - URL: <http://antiphon.se/en/products>. (Дата обращения 24.02.2025)
5. Троицкий А.В. Динамическая прочность компактных резонирующих вибропоглотителей, применяемых в судовых валопроводных системах // Труды крыловского государственного научного центра. - 2022. - С. 52-57. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-52-57.
6. Сятковский А.И. Термопластичные пленочные материалы для демпфирования инженерных конструкций // Пластические массы. - 2023. - N 9-10. - С. 48-52. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-9-10-48-52.
7. Кирпичников В.Ю., Кощеев А.П., Сятковский А.И., Экспериментальные исследования эффективности армированных вибропоглощающих покрытий // Журнал прикладной механики и технической физики. - 2022. - N 1. - С. 65-70. DOI: 10.15372/PMTF20220109.
8. Платонов М.М., Шульдешов Е.М., Нестерова Т.А., Сагомонова В.А. Акустические полимерные материалы нового поколения // Труды ВИАМ. - 2016. - Т 40. - N 4. - С. 76-84. DOI: 10.18577/2307-6046-2016- 0-4-9-9.
9. Сагомонова В.А. Слоистые вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов и органических волокон и технология их изготовления: дис. ... канд. тех. наук: 05.17.06 / Сагомонова Валерия Андреевна. - М., 2021. - 154 с.
10. Колпачков Е.А., Петрова А.П., Курносое А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ // Труды ВИАМ. - 2019. - Т 83. - N 11. - С. 22-36. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
11. Лишанский И.С., Померанцев В.И., Семенова Л.С., Будовская Л.Д., Меньшикова А.Ю., Евсеева Т.Г., Иванова В.Н. Вибропоглощающие полимерные системы // Синтез, структура и свойства полимеров. - 1989. - С. 110-119.

References

1. Crocker M.J. Handbook of Noise and Vibration Control. - John Wiley & Sons, Inc, 2007. - 1569 p. - ISBN 978-0-471-39599-7.
2. NIPPON STEEL Corporation [Internet source]. - URL: <http://www.nipponsteel.com>. (access date 24.02.2025)
3. Roush Enterprises [Internet source]. - URL: <http://www.roush.com>. (access date 24.02.2025)
4. Antiphon AB [Internet source]. - URL: <http://antiphon.se/en/products>. (access date 24.02.2025)
5. Troitsky A.V. Dynamic strength of compact resonating vibration absorbers used in ship propeller systems // Proceedings of the Krylov State Research Center. - 2022. - P. 52-57. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-52-57.
6. Syatkovsky A.I. Thermoplastic film materials for damping engineering structures // Plastics. - 2023. - N 9-10. - P. 48-52. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-9-10-48-52.
7. Kirpichnikov V.Yu., Koshcheev A.P., Syatkovsky A.I., Experimental studies of the effectiveness of reinforced vibration-absorbing coatings // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2022. - N 1. - С. 65-70. DOI: 10.15372/PMTF20220109.
8. Platonov M.M., Shuldeshev E.M., Nesterova T.A., Sagomanova V.A. New generation acoustic polymeric materials // Proceedings of VIAM. - 2016. - Vol 40. - N 4. - С. 76-84. DOI: 10.18577/2307-6046-2016- 0-4-9-9.
9. Sagamonova V.A. Layered vibration-absorbing materials based on thermoplastic elastomers and organic fibers and their manufacturing technology: the dissertation of the

Candidate of Technical Sciences: 05.17.06 / Сагомонова Валерия Андреевна. - М., 2021. - 154 с.

10. Kolpachkov E.A., Petrova A.P., Kurnosov A.O., Sokolov I.I. Methods for molding aviation products from PCM // Proceedings of VIAM. - 2019. - Т 83. - N 11. - С. 22-36. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.

11. Lishansky I.S., Pomerantsev V.I., Semenova L.S., Budovskaya L.D., Menshikova A.Yu., Evseeva T.G., Ivanova V.N. Vibration-absorbing polymer systems// Synthesis, structure and properties of polymers. - 1989. - С. 110-119.