

УДК 621.357

**УПРУГОДИССИПАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

В.М. РУДЬКО, д-р техн. наук, проф. В.К. ШЕЛЕГ
(Белорусский национальный технический университет, Минск),
канд. техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, канд. техн. наук М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)

Исследована возможность демпфирования колебаний нанесением на детали газопламенных покрытий из различных материалов. Установлено, что покрытия толщиной 0,9...1,5 мм из порошковых и проволоочных металлических материалов, а также порошков термопластичных полимеров могут обеспечить повышение демпфирующих свойств деталей машин на 35...45 %. Отмечена связь пористости покрытий с упругодиссипативными характеристиками. Предложена конструкция покрытий и способ их формирования, обеспечивающие эффективное звукопоглощение в заданном частотном диапазоне. Показано, что использование газопламенных покрытий может обеспечить значительное снижение отрицательного влияния вибраций на эксплуатационные показатели технологического оборудования и условия труда обслуживающего персонала.

Введение. Вибрации и шум, возникающие в процессе эксплуатации различных механических систем, отрицательно влияют на их служебные характеристики, повышают интенсивность изнашивания подвижных сопряжений, ухудшают качество выпускаемой продукции и оказывают неблагоприятное воздействие на организм человека. Учитывая, что одной из тенденций современного машиностроения является создание механических систем, обеспечивающих значительное повышение производительности при одновременном снижении их массы и увеличении ресурса, проблема борьбы с шумом и вибрациями становится весьма актуальной.

В последние годы в экономически развитых странах для повышения износостойкости и борьбы с шумом и вибрациями подвижных сопряжений механических систем ведутся интенсивные работы по разработке технологий получения композиционных материалов и покрытий с высокими износостойкими и вибропоглощающими свойствами [1 – 3]. Их использование в механических системах позволяет значительно повысить износостойкость контактирующих поверхностей и создать барьер на пути распространения колебаний практически во всем диапазоне частот. К настоящему времени установлено, что данные материалы или покрытия, как правило, представляют собой слоистые системы из компонентов с различными модулями упругости [4, 5].

К числу наиболее экономичных и интенсивно развивающихся технологий формирования многослойных композитов можно отнести газотермическое и, в частности, газопламенное напыление покрытий из полимерных и металлических материалов. Используя указанные методы, представляется возможным получать уникальные по свойствам покрытия систем «металл – металл – керамика», «металл – полимер» и «полимер – металл – керамика» [6], которые могли бы быть использованы для эффективного повышения не только износостойкости, но и рассеивания энергии колебаний в подвижных сопряжениях механических систем. Указанные покрытия можно формировать на подшипниковых опорах шпиндельных узлов, рабочих поверхностях зубьев зубчатых колес, направляющих в опорах скольжения станков, столов механизмов подачи и др.

Цель исследований. Цель исследований, результаты которых приведены в данной работе, – определение упругодиссипативных характеристик газопламенных покрытий из различных материалов, а также разработка новых конструкций покрытий, обеспечивающих эффективное поглощение и рассеивание энергии колебаний и обладающих необходимыми механическими и триботехническими характеристиками.

Методика проведения исследований. Образцы изготавливались в виде прямоугольных пластинок (2×20×80 мм) из стали 20 (состояние поставки) и литого серого чугуна СЧ-20. Перед нанесением покрытий одну из поверхностей пластинок подвергали струйно-абразивной обработке. Газопламенное напыление покрытий осуществлялось с помощью оборудования: установки УПТР-1-90 – напыление металлических порошков; установки «ТЕРКО» – напыление металлических проволок; установки «ТЕРКО-П» – напыление порошка полиэтилентерефталата марки ПЭТФ ТУ 6-06-С199-86 с размером частиц до 200 мкм [6]. В качестве горючего газа использовался пропан-бутан.

Оценку упругодиссипативных характеристик покрытий осуществляли по методу эталонного удара, с использованием виброизмерительного стола и установки для записи и анализа свободных затухающих колебаний [7, 8].

С помощью виброизмерительного стола фиксировались значения максимальных уровней виброускорений, возникающих в результате удара эталонного шарика по закрепленным на столе плоским образцам без покрытий и с покрытиями из различных материалов. Измерение виброускорений осуществлялось пьезоэлектрическим датчиком типа КД-41 с последующим усилением сигнала на усилителе «Kistler-501» и его регистрацией на ПЭВМ. Толщина покрытий варьировалась в диапазоне от 0,25 до 2,5 мм. Изменялись также вид материала и пористость нанесенного слоя.

В качестве относительного показателя рассеивания энергии колебаний использовали значения коэффициента передачи виброускорений K , равного отношению уровней виброускорений стола с закрепленными образцами с покрытием $Z_{\text{покр}}$ и без покрытия Z_0 :

$$K = Z_{\text{покр}} / Z_0.$$

Установку для записи и анализа свободных затухающих колебаний применяли для определения демпфирующей способности полимерных покрытий, сформированных газопламенным напылением полимерного порошка полиэтилентерефталата марки ПЭТФ, ТУ 6-06-С199-86, с размером частиц до 200 мкм. Адгезия покрытия к основе составляла 7,0...7,2 МПа. В качестве характеристики демпфирования использовали логарифмический декремент затухания колебаний δ , определяемый по виброграммам записи свободных затухающих изгибных колебаний пластинок в интервале амплитуд от $\pm 0,5$ до ± 250 мкм.

Исследование влияния толщины покрытия на интенсивность затухания колебаний образцов проводилось непосредственно после нанесения покрытия на образец с последующим удалением слоев покрытия до поверхности основного металла.

Логарифмический декремент колебаний при построении диаграммы его зависимости от амплитуды деформации определялся по формуле [1]:

$$\delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{A_0}{A_n},$$

где δ – логарифмический декремент затухания колебаний; n – число циклов колебаний; A_0 – начальная амплитуда колебаний; A_n – амплитуда колебаний через n циклов.

Результаты и обсуждение. Испытания методом удара эталонного шарика показали, что относительный коэффициент передачи виброускорений существенно зависит от толщины покрытия и пористости (рис. 1). При толщине покрытия 2 мм рассеивание энергии колебаний достигает 3...4,5-кратного значения по сравнению с образцом без нанесенного слоя, а увеличение пористости с 12 до 20 % снижает уровень передаваемых виброускорений почти в 2 раза.

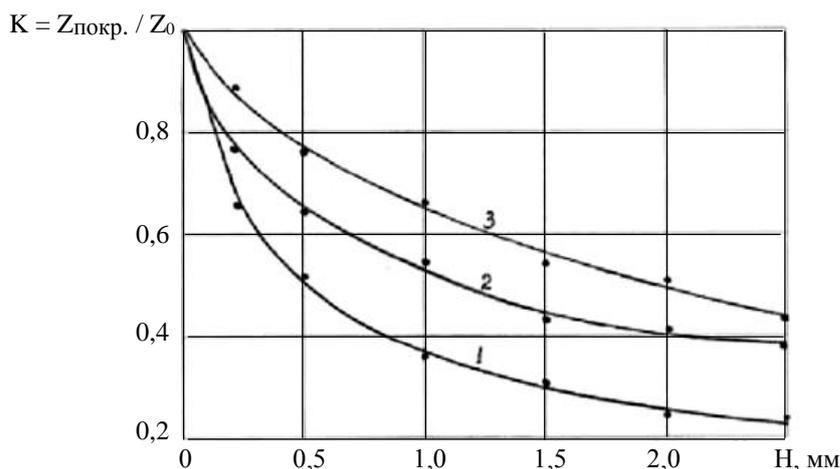


Рис. 1. Зависимость относительного коэффициента передачи виброускорений K от толщины покрытий, напыленных порошками БрОФ10-1 (1, 2) и БрАЖ9-4 (3). Пористость покрытий: 1 – 20 %; 2, 3 – 12 %

Необходимо отметить, что повышение общей пористости покрытий более 20 % резко снижает величину прочности сцепления покрытий с основой. Кроме того, невозможно формирование газотермических покрытий с размером (диаметром сечения) пор более 20 мкм без резкого снижения механических свойств [6].

Для того чтобы повысить общую пористость покрытий без значительного уменьшения физико-механических характеристик, было предложено перед струйно-абразивной обработкой на поверхность деталей наносить треугольную резьбу с наклоном биссектрисы угла профиля резьбы к оси детали, а при напылении слоя ось струи напыляемых частиц располагать перпендикулярно биссектрисе угла профиля резьбы. Такое взаимное расположение струи частиц и профиля резьбы не позволяет полностью заполнять напыляемым материалом углубления, выполненные в детали, что обеспечивает формирование «искусственных» пор, вдвое увеличивающих показатель общей пористости покрытия (до 35 %).

Причем расположение пор (у границы с основой) соответствует условиям, обеспечивающим значительное улучшение вибропоглощающих свойств покрытий.

Для выбора рациональных параметров резьбы методом эталонного удара были проведены испытания образцов с покрытиями толщиной 2,5 мм, полученными распылением латунной проволоки ПрЛ-59.

Установлено, что наиболее высокими демпфирующими свойствами обладают покрытия, нанесенные на поверхности с треугольной резьбой, выполненной шагом 1,5... 1,75 мм, с углом наклона биссектрисы угла профиля к оси детали от 45 до 60° (таблица).

Влияние шага и угла наклона профиля резьбы на коэффициент передачи ускорений

Шаг резьбы	Угол наклона биссектрисы угла профиля резьбы к оси детали	Коэффициент передачи ускорений
0,80	30	0,60
1,0	30	0,45
1,25	45	0,42
1,50	45	0,40
1,75	45	0,32
1,80	45	0,64
1,50	25	0,60
1,50	30	0,44
1,50	45	0,35
1,50	50	0,36
1,50	55	0,34
1,50	60	0,36
1,50	65	0,59
1,50	70	0,71

На рисунке 2 (а, б) приведены экспериментальные зависимости логарифмического декремента затухания колебаний для напыленных полимерных покрытий различной толщины.

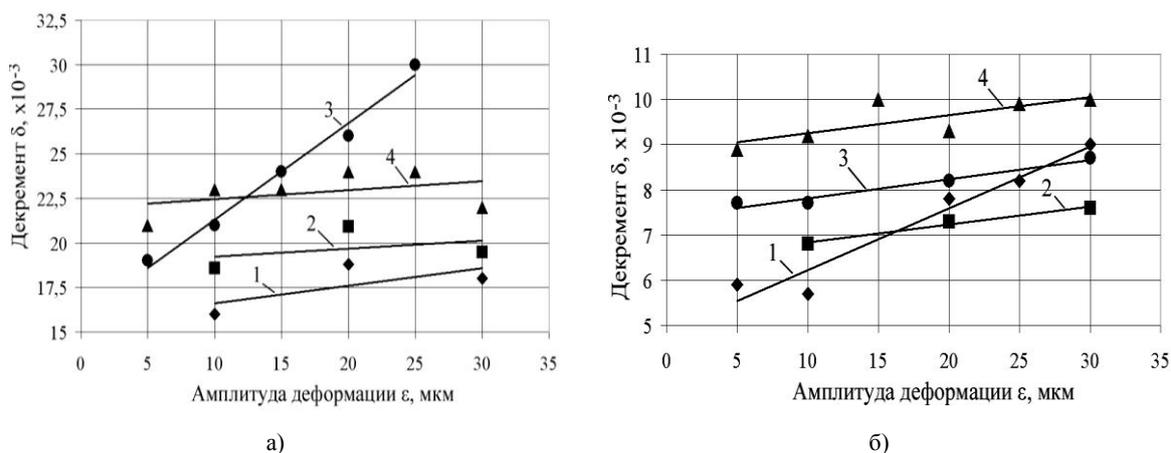


Рис. 2. Зависимости логарифмического декремента затухания колебаний от амплитуды деформации образцов из серого чугуна СЧ-20 (а) и стали 20 (б) с полимерным покрытием различной толщины:

- а) 1 – без покрытия; 2 – с покрытием толщиной 0,54 мм;
3 – с покрытием толщиной 0,93 мм; 4 – с покрытием толщиной 1,582 мм;
б) 1 – без покрытия; 2 – с покрытием толщиной 0,373 мм;
3 – с покрытием толщиной 0,88 мм; 4 – с покрытием толщиной 1,232 мм

Как видно из приведенных рисунков, напыленные полимерные покрытия повышают величину логарифмического декремента, а следовательно и демпфирование колебаний. При малых амплитудах деформации для образцов из серого чугуна (см. рис. 2, а) затухание увеличивается в 1,3...1,4 раза. При больших амплитудах – в 1,2...1,3 раза.

При толщине покрытия 0,9...1,0 мм затухание колебаний протекает более интенсивно (см. рис. 2, а, линия 3). В данном случае значение декремента при увеличении амплитуды деформации возрастает в 1,6...1,7 раза.

Для образцов из стали 20 (см. рис. 2, б) при малых амплитудах деформации затухание увеличивается в 1,4...1,5 раза. При увеличении амплитуды деформации наблюдается рост декремента затухания в самом образце (см. рис. 2, б, линия 1). Значения данного параметра могут быть выше, чем у образцов с покрытием толщиной от 0,3 до 1,0 мм.

Необходимо отметить, что данный факт пока не получил достаточных объяснений. Логично предположить, что если с увеличением амплитуды деформации возрастает затухание в самом образце, то соответственно должно возрастать затухание и у образцов даже со сравнительно небольшой толщиной покрытия. Однако из полученных данных этого не следует. Очевидно, что для выяснения данного вопроса требуется проведение дополнительных исследований.

Рисунок 3 иллюстрирует зависимости логарифмического декремента затухания колебаний от толщины покрытий, построенные с использованием значений амплитуд половинного спада, т.е. амплитуд, составляющих половину начальной амплитуды $A_n = \frac{A_0}{2}$ колебаний.

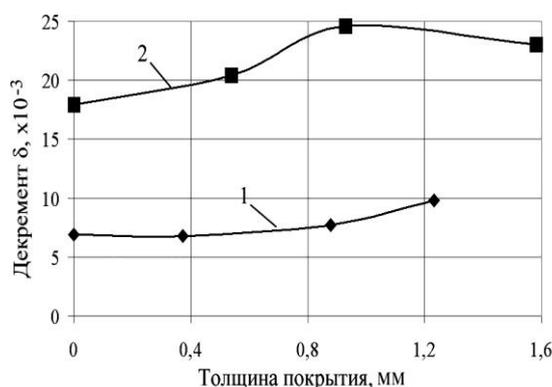


Рис. 3. Зависимости логарифмического декремента затухания колебаний от толщины напыленных полимерных покрытий:
1 – сталь 20; 2 – серый чугун СЧ-20

Как видно из рисунка, наблюдается увеличение декремента затухания колебаний с ростом толщины полимерных покрытий. Для образцов из серого чугуна СЧ-20 (см. рис. 3, кривая 2) при толщине покрытия 0,9...1,0 мм увеличение декремента составляет 35...38 %. Для образцов из стали 20 соответствующее увеличение на 42...45 % составляет при толщине покрытий 1,2...1,3 мм.

Необходимо отметить, что при изучении демпфирующих свойств материалов и покрытий одним из основных является вопрос о механизме и причинах рассеивания колебательной энергии [1 – 3].

Влияние покрытий на интенсивность затухания свободных колебаний объясняют действием следующих факторов:

- потеря энергии колебаний, обусловленных природой материала нанесенного слоя полимера;
- потеря, имеющих место в пограничном слое между основным металлом и покрытием;
- потеря, обусловленных явлениями, сопутствующими процессу газопламенного напыления;
- потеря, обусловленных увеличением массы образца [1 – 3].

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что повышение демпфирующей способности образцов с покрытием вряд ли связано со снижением частоты собственных колебаний пластинок за счет увеличения их массы в результате нанесения покрытия. Указанное снижение незначительно, и для стали 20 составляет 2,5...3,0 %, для чугуна СЧ-20 – 3...3,5 %.

Есть все основания полагать, что основную роль в повышении демпфирующей способности играют факторы, связанные как с природой материала полимерного покрытия, так и явлениями, сопутствующими газопламенному напылению и адгезионному взаимодействию покрытия с основой.

Выводы. Покрытия, сформированные газопламенным напылением металлических порошков или проволоки, значительно повышают демпфирующую способность деталей машин и технологического оборудования, работающих в циклических режимах нагружения. При этом демпфирование колебаний во многом зависит от толщины и пористости покрытия. При толщине покрытия 2 мм рассеивание энергии колебаний повышается в 3...4,5 раза по сравнению с образцами без покрытия. Пористость покрытия в пределах от 12 до 20 % повышает демпфирование почти в 2 раза.

Перспективным с точки зрения улучшения упругодиссипативных характеристик деталей машин является разработка методов формирования покрытий с преднамеренным увеличением числа пор. Это можно реализовать путем изготовления детали с поверхностью под нанесение покрытия, выполненной в виде треугольной резьбы, с определенным наклоном биссектрисы угла профиля резьбы к оси детали.

Экспериментально установлено, что покрытия, нанесенные на поверхности с треугольной резьбой, выполненной с шагом 1,5...1,75 мм, с углом наклона биссектрисы угла профиля к оси детали от 45 до 60° обеспечивают наилучшую способность рассеивания энергии колебаний.

Полимерные покрытия, сформированные методом газопламенного напыления порошковых полимерных материалов на поверхностях деталей и узлов машин, могут обеспечить повышение их демпфирующих свойств на 35...45 %, при толщине покрытия 0,9...1,5 мм.

Благодаря указанным покрытиям представляется возможным обеспечить значительное снижение отрицательного влияния вибраций на эксплуатационные показатели технологического оборудования и условия труда обслуживающего персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рассеяние энергии при колебаниях механических систем / Под общ. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 368 с.
2. Чернышев В.М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов. – М.: Наука, 2004. – 288 с.
3. Тамаки Коити. Композиционный материал с высокой демпфирующей способностью. Заявка 62-297450, Япония. – МКИ С23С 4/00. Опубл. 24.12.87 г.
4. Гадалов В.Н., Зуев В.А. К расчету демпфирующих характеристик защитных покрытий // Внутреннее трение в исследованиях металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Наука, 1989. – С. 71 – 73.
5. Влияние неоднородностей различной природы на коэффициент звукопоглощения / З.Н. Адинцова, П.В. Сысоев, В.Я. Прушак, А.В. Протасеня // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 1996. – № 1. – С. 33 – 35.
6. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. – Мн.: Технопринт, 2004. – 200 с.
7. Демпфирующие свойства тонких покрытий / М.А. Леванцевич, А.А. Лукашик, Н.Н. Ишин и др. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонГТУ, 2003. Вып. 28. – С. 94 – 98.
8. Оценка качества наноструктурных покрытий по декременту затухания колебаний / М.А. Леванцевич, А.А. Лукашик, Т.И. Бодрых, Л.И. Степанова // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2004. – С. 113 – 115.