



КОМПОЗИТЫ

В МАШИНОСТРОЕНИИ
И ТРАНСПОРТЕ



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ

Гомель 2024



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

КОМПОЗИТЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ТРАНСПОРТЕ

Материалы Международной научно-практической конференции
(Гомель, 20 апреля 2023 г.)

Под общей редакцией доктора технических наук, профессора А. А. ЕРОФЕЕВА

Гомель 2024

УДК 620.22
ББК 30.3
К63

Редакционно-издательская группа:

*А. А. Ерофеев (отв. редактор), В. Л. Моисеенко (зам. отв. редактора),
К. В. Максимчик (отв. секретарь)
В. А. Довгяло, П. Н. Богданович, А. Н. Попов, Г. М. Потапенко*

*Редакционно-издательская группа не ставит задачей рецензирование
и редактирование представленных статей.*

Ответственность за содержание статей лежит на авторах.

Композиты в машиностроении и транспорте : материалы Между-
нар. науч.-практ. конф. (Гомель, 20 апреля 2023 г.) ; под общ. ред.
К63 А. А. Ерофеева / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бело-
рус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 106 с. – Цифровое
электр. изд. – Загл. с тит. экрана. – Электр. текст. дан. – 4,04 Мб. –
Систем. требования : Adobe Reader.
ISBN 978-985-891-198-0

В сборник включены материалы конференции по современным технологи-
ям композиционных материалов, физико-химическим основам формирования
структуры композиционных материалов, технологиям оборудования высоко-
температурных материалов, компьютерному моделированию технологий.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов, сту-
дентов и специалистов, занятых изучением и разработкой современных тех-
нологий композиционных материалов.

УДК 620.22

ISBN 978-985-891-198-0

© Оформление. БелГУТ, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Богданович П. Н., Станкевич В. М., Воробьев И. В., Кривенков А. А.</i> Усталостное разрушение циклически нагружаемых деталей трибосопряжений	5
<i>Брундуков А. С., Шилько И. С.</i> Определение ударной вязкости стеклонаполненного полиэфирэфиркетона при повышенных температурах	9
<i>Гарбарук В. Ю.</i> Применение полимерных микроволоконистых материалов для очистки газожидкостных сред.....	11
<i>Гегедеш М. Г., Комаровский Н. В.</i> Анализ напряженно-деформированного состояния композитных подрельсовых прокладок на основе компьютерного моделирования	14
<i>Ефимчик К. В., Кудина Е. Ф.</i> Применение композитов в железнодорожном транспорте.....	17
<i>Жукалов В. И., Скороход А. З.</i> Применение полимерных покрытий для повышения эксплуатационных характеристик пожарных центробежных насосов	20
<i>Жуковский Е. М., Шебеко М. Р.</i> Современные дорожные асфальтовые композиты для ремонта дорог.....	23
<i>Камолова И. О., Сайдахмедов Р. Х.</i> Выбор состава твердосплавного инструмента по адгезионным критериям.....	24
<i>Каплюк И. И.</i> Анализ прочности элементов токосъемников, изготовленных из композиционных материалов	26
<i>Киргинцева С. В., Можаровский В. В.</i> Математические модели расчета контактных параметров для подшипников скольжения из волоконистых композитов.....	29
<i>Козел А. Г.</i> Постановка задачи об изгибе круговой нагрузкой композитной пластины, связанной с упругим основанием.....	32
<i>Коновалова А. Р., Понамаренко Д. И.</i> Композитные шпалы	34
<i>Копытков В. В., Жакипбаев Б. Е.</i> Работа тренажера «Пожарный насос» на современной приборной базе	37
<i>Кривогуз Ю. М., Усова В. Н., Коваль В. Н.</i> Получение и некоторые свойства смесей полиамида 6 с алифатическим поликетонам	40
<i>Кудина Е. Ф., Приходько И. В., Курицын П. А., Гончаров Г. Р., Прищепов П. А.</i> Разработка и применение композиционных материалов в транспортном машиностроении	43
<i>Лачугина Е. А.</i> Частоты собственных колебаний пятислойной круговой пластины, защемленной по контуру	46
<i>Леоненко Д. В.</i> Термоупругий изгиб круговой композитной пластины ступенчато-переменной толщины	48
<i>Малашков Д. В., Неверов А. С.</i> Применение композитов на основе гипсовых вяжущих в машиностроении	49
<i>Мельникова А. С.</i> Постановка задачи об изгибе упругопластической композитной пластины со сжимаемым наполнителем в терморadiационном поле	52
<i>Маркова М. В.</i> Способы снижения материалоемкости круговой трёхслойной пластины.....	54

<i>Моисеенко В. Л., Максимчик К. В.</i> Особенности пропитки природных композиционных материалов	56
<i>Моисеенко В. Л., Максимчик К. В.</i> Распределение усилий прессования при деформировании заготовок из природных композиционных материалов	58
<i>Мордас М. С.</i> Применение дренажного асфальтобетона в строительстве автомобильных дорог	60
<i>Неверов А. С., Самусева Л. В., Фёдоров Е. С.</i> Изучение коррозионной активности хлорида натрия в качестве технологической добавки к вяжущим веществам	62
<i>Нестерович А. В.</i> Неосесимметричное нагружение круглой физически нелинейной пластины	65
<i>Овчинников К. В., Шаповалов В. М., Коваленко М. А., Напреев Р. С.</i> Использование древеснополимерных композитов для изделий машиностроительного назначения	67
<i>Остриков В. О., Остриков О. М.</i> Постановка статической задачи о расчете сил, действующих на границах раздела аустенит/мартенсит мартенситной прослойки в механически нагруженном призматическом ферромагнитном монокристалле состава Гейслера с памятью формы, находящемся в жесткой заделке, в случае непараллельных границ раздела	70
<i>Отока А. Г.</i> Применение композиционных материалов в сфере неразрушающего контроля на железнодорожном транспорте (обзор)	73
<i>Подобед Д. Л.</i> Полимерные композиционные материалы на основе смесей вторичных полиолефинов для изделий электротехнического назначения	77
<i>Попов А. Н., Дмитрико И. Л.</i> Формирование покрытий алюминитрида титана из составного катода	80
<i>Сайдахмедов Р. Х., Сайдахмедова Г. Р.</i> Определение толщины функциональных покрытий, формируемых ионно-плазменным методом	83
<i>Самусева Л. В., Праведная М. А.</i> Развитие коррозии при фильтрации углекислотных вод через бетон	86
<i>Саркисов О. А., Радкович Н. Н.</i> Улучшение эксплуатационных свойств резинотехнических изделий методами поверхностной модификации	88
<i>Скорород А. З., Абдусаматов М.</i> Моделирование износостойчивости эпоксикомпозитов вариацией механических характеристик	89
<i>Стратанович В. А., Брундуков А. С., Шилько И. С.</i> Износостойкость стеклонанополненного полиамида 46 при трении в присутствии незакрепленного абразива	94
<i>Ходер В. Б., Кордикова Е. И.</i> Установление условий хранения фотополимерных наполненных композиций	96
<i>Шаповалов В. М., Винидиктова Н. С., Коваленко М. А., Овчинников К. В.</i> Биоразлагаемые композиты на основе возобновляемого растительного сырья для отделочных материалов в машиностроении	99
<i>Швецов А. Н., Бобарикин Ю. Л.</i> Зависимость технологических свойств слоистого металлополимерного материала с дисперсным порошковым слоем от режимов электроимпульсной обработки	101
<i>Швецов А. Н., Шишков С. В.</i> Исследование фрикционных свойств порошковых покрытий на основе карбида вольфрама и кобальта	104

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

*П. Н. БОГДАНОВИЧ¹, В. М. СТАНКЕВИЧ², И. В. ВОРОБЬЕВ¹,
А. А. КРИВЕНКОВ¹*

¹Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

²Филиал «Институт профессионального образования»

Университета гражданской защиты МЧС Беларуси

Рассмотрены особенности усталостного изнашивания и объемного разрушения циклически нагружаемых деталей узлов трения.

Поскольку сопрягаемые при трении поверхности деталей волнисты и шероховаты, каждый из внедрившихся выступов поверхности более твердой детали (контртела) деформирует менее твердый материал поверхностного слоя сопрягаемой (изнашиваемой) детали. В направлении движения выступа материал впереди него испытывает деформации сжатия ϵ_y , а за ним и в зоне контакта – деформации растяжения. Максимум ϵ_y сжатия по модулю несколько ниже ϵ_y растяжения. В направлении, перпендикулярном поверхности трения, впереди выступа материал растягивается, а под ним сжимается. Деформации сжатия ϵ_z на порядок и более превышают по модулю ϵ_z растяжения. Поверхностный слой изнашиваемой детали испытывает также противоположные по знаку и соизмеримые по модулю деформации сдвига γ_{zy} [1]. Таким образом, при одном проходе внедрившегося выступа изнашиваемый материал испытывает знакопеременные нормальные деформации и деформации сдвига. Кроме того, пластические деформации материала на пятнах контакта вызывают импульсное повышение температуры, которая снижает его механические характеристики и является причиной возникновения напряжений [2, 3].

Наблюдающиеся при трении многократные знакопеременные деформации описанного характера приводят к появлению на поверхности трения усталостных микротрещин, ориентированных перпендикулярно вектору скорости v . Зарождение микротрещины на поверхности трения происходит в том случае, когда максимум касательных напряжений выходит на эту поверхность, т. е. при коэффициенте трения, превышающем 0,3. Здесь возможны два варианта распространения микротрещин.

Первый из них – появившись на поверхности трения, микротрещина поворачивается и распространяется почти параллельно поверхности трения. Впоследствии, выходя на поверхность, она отделяет от основного материала ча-

стицу износа в виде пластинок. Этот вариант наблюдается, в частности, при изнашивании поверхности катания колеса подвижного состава (рисунок 1).

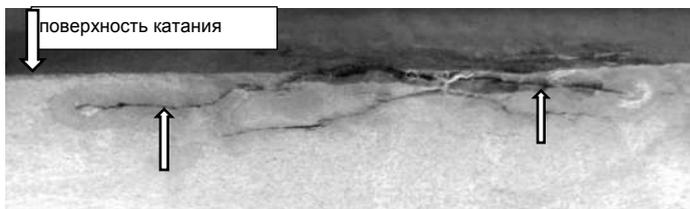


Рисунок 1 – Усталостное разрушение поверхности катания колеса

Второй вариант – распространение трещин на значительную глубину с сохранением ориентации перпендикулярно поверхности трения. В этом случае образуются частицы износа вследствие скалывания материала по краям микротрещин, ширина которых постепенно увеличивается. Чаще всего такой вид усталостного разрушения наблюдается при высоких контактных напряжениях либо при дополнительном циклическом объемном нагружении детали. Так, при длительном трении тормозной колодки по гребню колеса тепловоза на его поверхности возникла сетка микротрещин, ориентированных перпендикулярно вектору скорости v движения (на рисунке 2 показаны стрелкой 1). Одна из них превратилась в магистральную трещину, которая вызвала полное разрушение обода колеса в радиальном направлении. Для оценки характера распространения трещин был вырезан фрагмент гребня и осуществлен излом его по одной из микротрещин. Видно, что излом фрагмента произошел по трещине, усталостная природа которой подтверждается наличием усталостных колец (см. в направлении стрелки 2). Расположение колец указывает на то, что зарождение микротрещины началось в их центре на поверхности трения.

Рост трещины вглубь детали обусловлен тем, что ее дно принимает форму клина, являющегося концентратором напряжений (рисунок 3). Снимок получен с помощью конфокального лазерного микроскопа. Здесь линия 2 – поверхность трения модельного образца, а линия 1 – контур дна усталостной трещины.

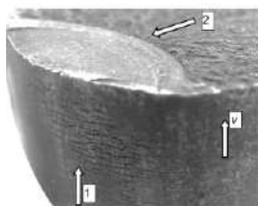


Рисунок 2 – Усталостное разрушение гребня колеса тепловоза

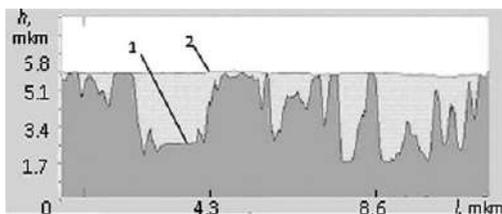


Рисунок 3 – Профиль дна усталостной трещины в изнашиваемом материале

Как следует из рисунка 2, магистральная трещина и объемное усталостное разрушение детали начинаются на изношенной поверхности, где образуются микротрещины с клинообразным дном. Подтверждением того, что зарождение магистральной трещины наиболее вероятно в изношенной области, является снимок подвергнутой объемной закалке шестерни редуктора шахтного конвейера (рисунок 4). Видно, что на всех зубьях шестерни трещины 1 начинают свой рост с зоны изнашивания 2 и, постепенно сужаясь, распространяются к противоположной стороне зуба.

Утверждение о том, что магистральная трещина, приводящая к объемному усталостному разрушению циклически нагружаемых деталей трибосопряжения, зарождается на поверхности трения, не всегда реализуется на практике. При высоких напряжениях в объеме детали возможно зарождение магистральной трещины в зоне, расположенной далеко от поверхности трения. Так, несмотря на наличие на поверхности катания ползуна и питтинга (рисунок 5), преждевременное разрушение колеса железнодорожного вагона с тонким ($h = 27$ мм) ободом произошло в результате развития магистральной трещины, зародившейся между диском и приободной частью (на расстоянии 47 мм от нижней границы обода). Видно, что разрушение носит явно выраженный усталостный характер практически на всей поверхности (рисунок 6). Разрушение колеса произошло вследствие развития усталостной трещины, которая распространялась по траектории, близкой к хорде вплоть до полного отделения фрагмента. Усталостный механизм разрушения колеса подтверждается наличием на поверхности отколовшегося фрагмента очагов начала разрушения и усталостных линий (колец), свидетельствующих о периодичности роста трещины, а также зон замедленного и ускоренного роста трещины и зон долома.

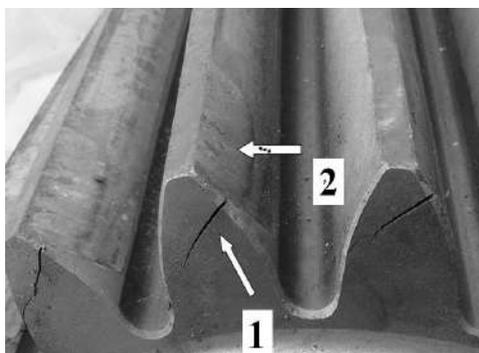


Рисунок 4 – Усталостное разрушение изношенных зубьев шестерни конвейера



Рисунок 5 – Поверхность катания железнодорожного колеса после изнашивания



Рисунок 6 – Поверхность усталостного разрушения отколовшегося фрагмента колеса

Причина такого характера разрушения в следующем. Вследствие малой массы тонкий обод после торможения нагревается до значительно более высокой температуры (при $h = 27$ мм максимальная температура T_{\max} достигает 666 °С), чем толстый (при $h = 70$ мм T_{\max} достигает 460 °С) [4]. Настолько высокий нагрев тонкого обода приводит к его тепловому расширению и, как следствие, к возникновению высоких растягивающих термических напряжений в диске. При этом обод колеса необратимо смещается в осевом направлении относительно ступицы, и по этой причине в объеме диска возникают остаточные напряжения. Кроме того, уменьшение h обода приводит к перераспределению нагрузки, диск становится более нагруженным, особенно в его наиболее тонкой приободной зоне. Возрастают механические напряжения, в том числе и наиболее опасные – растягивающие. При одном обороте колеса каждый элементарный объем материала приободной зоны диска подвергается как минимум одному знакопеременному циклу деформаций. Поэтому уменьшение h обода снижает сопротивление колеса усталостному разрушению.

Образующиеся при трении многочисленные микротрещины увеличивают вероятность зарождения магистральных трещин на изношенной поверхности и ускоряют процесс усталостного объемного разрушения деталей. Однако при высоком уровне циклически изменяющегося объемного НДС разрушение детали трибосопряжения может локализоваться в зоне, далеко отстоящей от поверхности трения.

Список литературы

- 1 **Богданович, П. Н.** Трение, смазка и износ в машинах : учеб. / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак, С. П. Богданович. – Минск : Тэхналогія, 2011. – 527 с.
- 2 **Bogdanowich, P. N.** Polymer Fatigue / P. N. Bogdanowich, D. V. Tkachuk // Encyclopedia of Tribology. Usa. – 2013. – P. 2578–2585.
- 3 **Bogdanowich, P. N.** Temperature fields in a high-speed friction contact P. N. Bogdanowich, D. V. Tkachuk // Tribologia. – 2004. – V. 193, no. 1. – P. 75–90.

4 Сакало, В. И. Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Косов. – М. : Машиностроение, 2004. – 496 с.

УДК 678.01:539.411.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТЕКЛОНАПОЛНЕННОГО ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. С. БРУНДУКОВ, И. С. ШИЛЬКО

*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли своё применение во многих отраслях промышленности. Особое место занимают термопласты, высокие физико-механические характеристики которых позволяют отказаться от других конструкционных материалов, например металлов или чугунов [1–3].

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) является современным высокоэффективным термопластом, обладает высокими механическими характеристиками при повышенных температурах в сочетании с высокой химической стойкостью [4–6]. Материал применяется в ответственных узлах, которые эксплуатируются в экстремальных условиях. К таким узлам относят системы клапанов компрессорного оборудования, где из ПКМ на основе ПЭЭК изготавливаются клапанные пластины.

Перемещение потока сжатого нагретого газа через всасывающие и нагнетательные клапаны последних ступеней, сопровождается быстрыми циклическими перемещениями клапанных пластин. При каждом срабатывании клапана пластина подвергается ударному воздействию как со стороны потока перекачиваемой среды, так и ответных металлических частей узла. В связи с этим актуальной является задача по определению ударной вязкости (УВ) ПКМ при повышенных температурах.

Испытания на удар по Шарпи [7] проводились на маятниковом копре VWL 1972, на котором регистрировали энергию, затраченную на разрушение образцов. Образцы вырезали из экструзионного листа и доводили до геометрии 4×6×50 мм без надреза. Расстояние между опорами составляло 40 мм.

Для определения влияния температуры на УВ стеклонеполненного ПЭЭК, образцы предварительно кондиционировали в течение 1 ч при температурах 50, 100 и 150 °С.

Определение УВ проводилось в двух направлениях: вдоль и поперёк направления экструзии. Расчёт УВ проводился по формуле

$$a_n = \frac{A_n}{bh} \cdot 10^3,$$

где A_n – энергия удара, затраченная на разрушение образца без надреза, Дж; b – ширина образца, составляет 4 мм; h – толщина образца, составляет 6 мм.

В результате был получен следующий график зависимости УВ a_n от температуры:

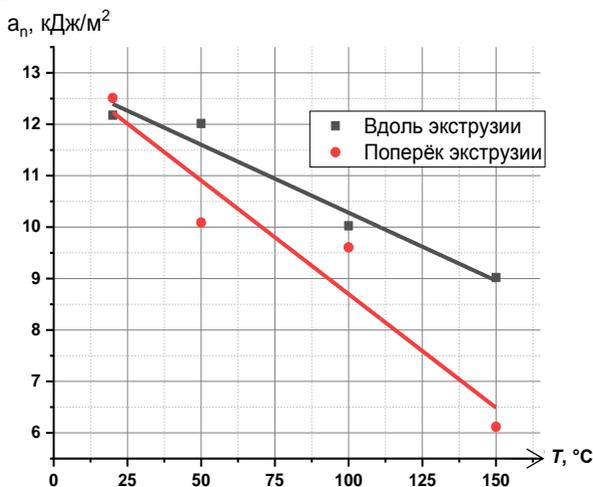


Рисунок 1 – График зависимости ударной вязкости от температуры для стеклонаполненного экструзионного ПКМ на основе ПЭЭК

С повышением температуры кондиционирования для исследуемого материала характерна тенденция увеличения анизотропии УВ. Для поперечного направления в исследуемом температурном интервале произошло уменьшение показателя УВ более чем в 2 раза.

Наибольшая анизотропия УВ характерна для температуры 150 °С и составила 29 кДж/м², что составляет 48 % относительно поперечного направления экструзии.

Исследованы закономерности изменения ударной вязкости стеклонаполненного ПКМ на основе ПЭЭК в интервале температур, соответствующих рабочим температурам компрессорного оборудования.

Список литературы

1 Сироткин, О. С. Новые конструкционные и функциональные ПКМ на основе термопластов и технологии их формования / О. С. Сироткин, М. А. Андрунина, Э. Я. Бейдер // *Авиационная промышленность*. – 2012. – № 4 – С. 43–47.

2 Свиридов, Е. Б. Книга о полимерах: свойства и применение, история и сегодняшний день материалов на основе высокомолекулярных соединений /

Е. Б. Свиридов, В. К. Дубовый. – 2-е изд. – Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, 2015. – 393 с.

3 **Серкова, Е. А.** Полимерные материалы для антифрикционных покрытий (обзор) / Е. А. Серкова, В. В. Хмельницкий, О. Б. Застрогина // Proceedings of VIAM. – 2021. – № 5. – С. 56–63.

4 **Хараев, А. М.** Полиэфиркетоны: синтез, структура, свойства, применение (обзор) / А. М. Хараев, Р. Ч. Бажева // Пластические массы. – 2013. – № 8. – С. 13–19.

5 **Хараев, А. М.** Полиэфирэфиркетоны: синтез, свойства, применение (обзор) / А. М. Хараев, Р. Ч. Бажева // Пластические массы – 2018. – Т. 0, № 7–8. – С. 15–23.

6 **Конгапшев, А. А.** Структура, синтез, свойства, применение полиэфиркетонов / А. А. Конгапшев, Р. Ч. Бажева, А. М. Хараев // Современные проблемы естествознания. – 2020. – С. 33–41.

7 ГОСТ 4647-2015. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи. Взамен ГОСТ 4647-80 ; введ. 2017-01-01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 18 с.

УДК 66.074.912

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕД

В. Ю. ГАРБАРУК

Научно-технический центр «ЛАРТА», г. Гомель, Республика Беларусь

Очистка потока от жидкостного загрязнения является одной из ключевых задач, возникающих в процессе подготовки промышленных газовых сред. В зависимости от характера и назначения газовой среды в потоке могут присутствовать конденсаты углеводородов, воды, масла, а также другие жидкости в виде капельно-аэрозольной фазы.

Эффективным методом отделения данных веществ от потока газа является использование фильтрующих материалов на основе микроволокон различной природы, в том числе полимерных.

Типичные аэрозольные капли, содержащиеся в газовых потоках, имеют размеры от 0,01 мкм до 50 мкм. Аэрозоли, образующиеся в ходе работы оборудования, представляют собой значительный поток отходов, а также опасность для здоровья людей. Медицинские данные связывают воздействие на работников тумана смазочно-охлаждающей жидкости с респираторными заболеваниями и несколькими видами рака. Респираторные заболевания, связанные с вдыханием вышеупомянутых аэрозолей, включают раздражение дыхательных путей, бронхит, профессиональную астму и потерю функции легких. Несколько эпидемиологических исследований также показали статистически значимое увеличение числа случаев рака пищевода, желудка, поджелудочной железы, гортани в результате длительного воздействия тумана смазочно-охлаждающих жидкостей. Для снижения воздей-

ствия аэрозоля на работников стратегии борьбы включают использование воздушных фильтров и туманоуловителей, а также добавление в смазочно-охлаждающую жидкость поверхностно-активных агентов, препятствующих образованию воздушно-масляного аэрозоля.

Коалесцентная фильтрация – это процесс, в котором капли, переносимые текущим потоком среды, захватываются волокнами фильтрующего материала. Последующие капли, переносимые газом, сталкиваются и коалесцируют с предыдущими каплями. Коалесценция происходит, когда две или более капли вступают в контакт друг с другом с энергией, достаточной для преодоления поверхностного натяжения, чтобы капли слились. Коалесцирующие капли увеличиваются в размере внутри фильтрующей среды до тех пор, пока сопротивление движущегося газа или сила тяжести не станут достаточно сильными, чтобы заставить увеличенные капли стечь с фильтра. Критический размер капли, после которого она отрывается от волокна, зависит от локальной скорости, размера волокна, межфазного натяжения и угла контакта.

По мере прохождения аэрозоля через фильтрующий материал частицы улавливаются в глубине волокнистого материала. Капли и частицы субмикронного размера захватываются четырьмя доминирующими механизмами захвата:

1 Диффузия. Частицы размером менее 0,3 мкм имеют очень малую массу. В связи с чем они перемещаются случайным образом из-за столкновений с молекулами воздуха, подобно молекулярной диффузии, наложенными на газовый поток. Случайное движение увеличивает вероятность того, что они придут в контакт с волокнами и будут захвачены.

2 Зацепление. Частицы в диапазоне 0,3–1 мкм в диаметре обычно следуют за воздушным потоком и перехватывают волокно, если расстояние от линии потока приближается к поверхности волокна менее чем на радиус частицы.

3 Инерционное столкновение. Когда плотная или крупная частица перемещается в газовом потоке, инерция частицы может быть достаточно большой, чтобы траектория частицы отклонялась от воздушного потока при изгибе воздуха вокруг волокна. Если траектория частицы проходит в пределах одного радиуса частицы до поверхности волокна, частица столкнется с волокном и будет захвачена. Аэрозоли, размер которых обычно превышает 1 мкм, следуют этому механизму захвата частиц.

4 Гравитационное осаждение. Если скорости в фильтрующей среде очень низкие, капли аэрозоля диаметром 20–50 мкм могут выпасть из воздушного потока, не достигнув фильтрующей среды. Если же они достигают среды, то продолжают падать, проходя через неё. Это вертикальное движение увеличивает вероятность того, что они столкнутся с волокном и будут захвачены.

Все эти механизмы происходят одновременно во всем объеме фильтрующей среды. Один или несколько из этих механизмов доминируют в зависимости от размера капель жидкости, и, хотя описанные здесь механизмы улавливания наиболее эффективны для частиц определенного диапазона размеров, увеличение или уменьшение скорости потока может привести к изменению эффективности улавливания. Считается, что захват на отдельном волокне зависит от локальных условий потока вокруг волокна, а при однородных свойствах фильтра захват на отдельном волокне является отображением всей фильтрующей среды. Основным допущением концепции одиночного волокна является то, что все волокна идентичны. Механизм одного волокна был широко принят в фильтрационной промышленности, поскольку он приводит к результатам, сопоставимым с экспериментальными. Размеры волокон, ориентация волокон, поверхностная энергия волокон и фильтра, поверхностное натяжение капель жидкости, скорость потока аэрозолей являются ключевыми параметрами, которые влияют на производительность фильтрующего материала.

Повышение эффективности разделения газа и жидкости на фильтре обычно сопровождается увеличением перепада давления на фильтре. Увеличение перепада давления можно разделить на три стадии. Когда в фильтре задерживается критическая масса жидкости, перепад давления быстро возрастает, затем стабилизируется и достигается устойчивое состояние, характеризующееся равновесием между дренажным потоком и потоком жидкости, поступающим в фильтр. Наконец, перепад давления становится постоянным и достигается устойчивое состояние. С этого момента масса жидкости, накопленная в фильтре, остается постоянной, а скорость дренажа, выходящего из фильтра, уравнивает скорость захвата капель жидкости. Эффективность отделения зависит от размера капель, вязкости жидкости, скорости газа, давления, температуры газа, структуры фильтрующего материала (диаметр волокон, ориентация волокон и плотность упаковки), свойств поверхности волокон, содержания связующего и толщины фильтра. Поверхностное натяжение жидкости оказывает решающее влияние на образование капель, хотя трудно разделить влияние поверхностного натяжения и вязкости жидкости, поскольку они пропорционально изменяются в зависимости от температуры.

Группа компаний «ЛАРТА» специализируется на разработке и производстве фильтрующих элементов, предназначенных для очистки природного и попутного газа, воздуха, масел и технологических жидкостей. Отличительной особенностью, способствующей повышению эффективности фильтрующих элементов, является собственное производство фильтрующих материалов по технологии аэродинамической вытяжки расплава и применение различных способов гидрофобной и олеофобной обработки этих материалов. Применение в конструкции фильтроэлементов оригинального супергидрофобного волокнисто-пористого фторопласта, а также термостойких полимеров, например полифениленсульфида, эксплуатирующе-

гося при температурах до 180 °С, позволяет существенно повысить их эффективность фильтрации и расширить области применения.

Таким образом, микроволокнистые фильтровальные материалы представляют собой большой класс изделий, широко применяемый для очистки газовых и жидкостных сред при различных, порой экстремальных, условиях. Постоянно пополняющаяся номенклатура волокнообразующих веществ и уточнение механизмов взаимодействия многофазных систем с развитой поверхностью фильтровальных волокон являются основой для изготовления устройств очистки, позволяющих оптимизировать технологические процессы и обеспечить необходимые условия безопасности труда.

УДК 625.142:691.175.3:004.94

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОДРЕЛЬСОВЫХ ПРОКЛАДОК НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Г. ГЕГЕДЕШ, Н. В. КОМАРОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

От надежности и прочности конструктивных элементов железнодорожного пути зависит безопасность пассажиров и сохранность перевозимых грузов. Одними из наиболее изнашиваемых составных частей рельсового пути являются подрельсовые прокладки, которые замедляют процесс изнашивания рельсов и крепежных соединений от воздействия нагрузок.

На линиях с низкой скоростью движения и небольшой нагрузкой на рельсы используют прокладки из каучука, на высокоскоростных линиях, где нагрузки на рельсы и шпалы повышены, применяют полиуретановые изделия. Также могут использоваться и другие материалы, характеристики которых удовлетворяют стандартам [1, 2], в том числе композитные материалы, обладающие повышенной прочностью, устойчивостью к износу и коррозии, амортизационной способностью, а также более легким весом. Композитные прокладки обычно изготавливают с использованием стекло-, карбонового и арамидного волокон, а также других наполнителей [3–5].

Целью представленной работы является сравнение напряженно-деформированного состояния подрельсовых прокладок, изготовленных из резиновой смеси с различной долей наполнителя на основе компьютерного моделирования в среде ANSYS.

Конечно-элементная модель резиновой надшпальной прокладки, соответствующая изделию ЦП-356 [6], включает 15 170 конечных элементов и приведена на рисунке 1. В соответствии с [2] она помещена между двумя стальными пластинами и подвергается воздействию прессы, максимальная сила нажатия которого составляет 90 кН.

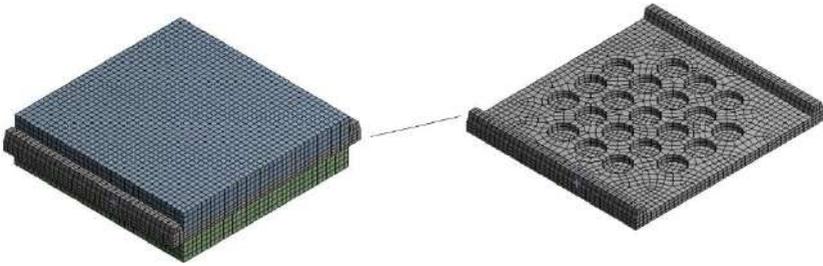


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель в среде ANSYS

Модуль упругости материала E и коэффициент Пуассона μ изменялся от 8 МПа и 0,499, что соответствует изделию из прочной резины [2], до 7304,5 МПа и 0,484, что соответствует композитной резиновой смеси, включающей 10 % стекловолокон, имеющих следующие прочностные характеристики: $E = 73$ ГПа, $\mu = 0,35$ [7].

Резина является полимером с высокой эластичностью. При добавлении в резиновую смесь стекловолокон до 10 % эластичные свойства конечного изделия сохраняются, так как стекловолокна хорошо гнутся без разрушения, в том числе при циклических нагрузках, возникающих при прохождении подвижным составом участка пути.

Результаты компьютерного моделирования приведены на рисунке 2.

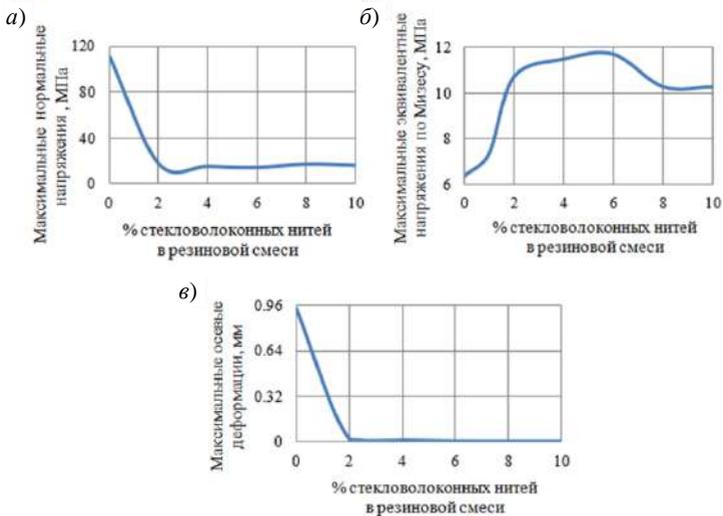


Рисунок 2 – Некоторые результаты расчетов в ANSYS Workbench:
 а – максимальные нормальные напряжения; б – максимальные эквивалентные напряжения;
 в – максимальные осевые деформации

При введении стеклонитей происходит резкое снижение нормальных напряжений в изделии в направлении действия пресса: на 56,92 % при 1 % наполнителя в резиновой смеси, на 84,15 % – при 2 % стекловолокон по сравнению с прокладкой из стандартного материала (см. рисунок 2, а). При добавлении в резиновую смесь 2–10 % стеклонитей нормальные напряжения постепенно снижаются всего в 1,32 раза.

Похожая картина наблюдается и на графике зависимости максимальных деформаций в направлении действия пресса (см. рисунок 2, в). Так, максимальные деформации подрельсовой прокладки с характеристиками, соответствующими резине, составляют 0,939 мм, что соответствует результатам испытаний, проведенных на испытательной машине TIME WDW-300 E, и подтверждает корректность используемой компьютерной модели.

Максимальные эквивалентные напряжения при введении в исходную смесь наполнителя незначительно возрастают, а затем их значения колеблются в районе 10 МПа (см. рисунок 2, б).

Таким образом, использование композитного материала для изготовления подрельсовых прокладок, включающего резиновую смесь и стекловолоконные нити, значительно улучшает прочностные характеристики изделий, что, в свою очередь, позволяет сократить число ремонтов подрельсовых оснований и повысить безопасность эксплуатации железнодорожных составов.

Список литературы

1 О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта. Технический регламент (ТР ТС 003/2011) : утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 № 710 : с изм. и доп. – М., 2011. – 52 с.

2 ГОСТ 34078–2017. Прокладки рельсовых скреплений железнодорожного пути. Технические условия. – Введ. 2018-01-01. – М. : Стандартинформ, 2017.

3 **Бондалетова, Л. И.** Полимерные композиционные материалы : учеб. пособие. – Ч. 1. / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2013. – 118 с.

4 **Джусупов, Р. Т.** Исследование характеристик резиновых композитов на основе каучука и стекловолокна для подрельсовых прокладок / Р. Т. Джусупов, Ю. И. Данилов, А. В. Кузнецов // Вестник Томского политехнического университета. – 2016. – Т. 328, № 2. – С. 39–46.

5 Development of rail pads from recycled polymers for ballasted railway tracks / J. M. Castillo-Mingorance [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 337. – P. 127479.

6 Прокладка ЦП-356 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://gdkom.ru/cp356>. – Дата доступа : 09.03.2023.

7 **Гутников, С. И.** Стеклые волокна : учеб. пособие / С. И. Гутников, Б. И. Лазорьяк, А. Н. Селезнев. – М. : МГУ, 2010. – 53 с.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

К. В. ЕФИМЧИК, Е. Ф. КУДИНА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время во всем мире производят огромное количество изделий из полимерных композиционных материалов (далее – ПКМ) с различными физико-механическими характеристиками.

Применение ПКМ при производстве подвижного железнодорожного состава, как грузового, так и пассажирского, обеспечивает его облегчение, удешевление, долговечность, а следовательно, и уменьшение затрат на его эксплуатацию. Уменьшение массы является важным критерием для обеспечения оптимального расположения центра тяжести кузовов вагонов, это очень важно для наклона кузова при движении с большими скоростями на крутых поворотах [1].

Для изготовления изделий из ПКМ, элементов экстерьера и интерьера подвижного состава железнодорожного транспорта в большинстве случаев используется технология контактного формования. Для контактного формования элементов в открытых формах применяют два метода: напыление и ручную укладку.

Следует отметить, что к композиционным материалам, используемым в транспортном машиностроении, предъявляют высокие требования к пожаробезопасным характеристикам: токсичности, горючести, тепловыделению при горении, дымообразующей способности. В связи с этим в качестве основы для связующего применяются пожаростойкие полиэфирные смолы. На рисунке 1 представлено применение ПКМ в современном железнодорожном транспорте.



Рисунок 1 – Применение ПКМ в железнодорожном транспорте

Следующим перспективным направлением применения ПКМ является изготовление железнодорожных шпал, которые выполняют важнейшую функцию. Они обеспечивают неизменное расположение рельсов, и являются демпфером между подвижным составом и земляным полотном.

В Республике Беларусь на железных дорогах в нынешнее время используются следующие основные виды шпал:

- деревянные, которые производятся в основном из кедра, лиственницы, сосны, березы;
- железобетонные, которые состоят из армированного бетона.

С 1990-х годов развитые страны мира начали применять полимерные шпалы на железных дорогах, в том числе и на скоростных (Китай, Япония). Также активно интересуются данным видом шпал и другие страны мира, особенно страны с влажным жарким климатом (Индия, США, Филиппины и Таиланд). Мировым лидером по производству шпал из ПКМ является США. В ходе поисков наиболее экономичных путей для альтернативы деревянным шпалам американские компании все больше внедряют полимерные. Однако и в настоящее время в США преобладают шпалы из дерева.

В разных странах мира разработан ряд технологических процессов для изготовления шпал из ПКМ. Эти технологии и стали потенциальной альтернативой замены деревянных шпал. В отличие от бетона и стали, Шпалам из ПКМ можно задать такие физико-механические характеристики, чтобы они повторяли поведение деревянных шпал. При этом пути со шпалами из древесины требуют проведения обязательного технического обслуживания, а шпалы из ПКМ практически не требуют технического обслуживания и более удобны с точки зрения экологии.

Несмотря на большое количество преимуществ разработанных в последнее время шпал из ПКМ, в настоящее время они получили очень ограниченное распространение в железнодорожной отрасли.

На рисунке 2 представлены шпалы из ПКМ.



Рисунок 2 – Применение ПКМ для изготовления шпал

Однако ожидается, что долгий срок эксплуатации шпал из ПКМ без проведения ремонтов и более низкая стоимость жизненного цикла компенсирует их высокую первоначальную стоимость, которая должна быть сопоставимой со стоимостью деревянных (бетонных) шпал или лишь незначительно превышать ее.

Также перспективным направлением является изготовление из ПКМ опор освещения и линий электропередач. Композитные столбы и опоры все чаще применяются вместо бетонных, деревянных и стальных. Эстетичный внешний вид, легкость монтажа, долговечность и удобство эксплуатации – основные аргументы в пользу выбора стеклопластика.

На рисунке 3 представлена опора контактной сети из ПКМ.

В настоящее время ПКМ широко используются для изготовления водопроводов, перил лестничных пролетов в искусственных сооружениях, километражных столбов.

Таким образом, можно сделать вывод, что количество и область применения изделий из ПКМ с каждым годом возрастает.



Рисунок 3 – Применение ПКМ для опоры контактной сети

Преимуществом изделий из ПКМ являются долговечность, легкость, морозостойкость, они не подвержены коррозии, не проводят электричество, не требуют обслуживания в процессе эксплуатации, легко поддаются вторичной переработке.

Список литературы

1 **Ефимчик, К. В.** Обеспечение работы железнодорожного транспорта с применением полимерных композиционных материалов / К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 27 мая 2022 г. / редкол. : А. А. Поддубный [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 174–176.

2 Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) / М. С. Дориомедов [и др.] // Труды ВИАМ. – 2016. – № 7. – С. 113–118.

УДК 621.671.22:678.01:537.222.2

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В. И. ЖУКАЛОВ¹, А. З. СКОРОХОД²

¹Филиал «Институт профессионального образования»

Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Гомель

²Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При работе пожарных центробежных насосов производится подача воды, как чистой, так и с посторонними включениями, а также растворов пенообразователей, которые подвергают поверхность рабочего колеса и проточной части насоса коррозионному и абразивному изнашиванию. Кроме того, процесс подачи воды сопровождается кавитационной эрозией поверхности рабочего колеса. Данные негативные явления служат причиной снижения параметров эксплуатационных характеристик центробежного насоса: напора (H), подачи (Q), мощности (P), коэффициента быстроходности (n_s) и коэффициента полезного действия (η). Поверхности проточных частей пожарного насоса недостаточно гладкие из-за литья его деталей в песочные формы. Поэтому ожидать высокого значения КПД насоса не приходится, тогда как чистота водопроводящих каналов рабочего колеса оказывает большое влияние на величину гидравлических потерь.

Работа центробежного насоса совершается, как правило, при постоянных температуре и давлении. Если давление постоянно, то роль энергии играет энтальпия. Работу при этих условиях можно представить в виде полного дифференциала или функции состояния, которая носит название изобарно-изотермического потенциала (энергия Гиббса) [1]. По физическому смыслу свободная энергия Гиббса – это та часть теплосодержания, которую тело может превратить в работу при постоянных температуре и давлении. При этом совершаемая работа существенно зависит от значений энтропии, которая является мерой убыли энергии Гиббса с увеличением температуры при постоянном давлении. Рост энтропии обусловлен появлением диссипативных сил, связанных с процессами трения на границе раздела жидкость – твердое тело.

С другой стороны, опытами И. И. Никурадзе [2] установлено, что коэффициент гидравлического трения в некоторых случаях зависит от числа Рейнольдса и от безразмерного геометрического фактора – относительной шероховатости. При этом физический смысл коэффициента гидравлического трения представляет собой отношение напряжения трения, связанного с энтропией, к величине гидродинамического напора. Область, в которой лежит коэффициент гидравлического трения при работе центробежного насоса, не зависит от числа Рейнольдса и определяется шероховатостью ограничивающих поверхностей и квадратом скорости движущейся жидкости. Известно, что увеличение чистоты поверхности каналов рабочих колес с Ra 12.5 до Ra 8 без каких-либо конструктивных изменений приводит к повышению КПД насосов на 3–5 % [3], поскольку трение в вихрях и трение жидкости о твердые поверхности внутри насоса приводит к снижению его напора. Это явление учитывается гидравлическим КПД.

Одним из путей повышения КПД пожарных центробежных насосов является применение полимерных покрытий рабочих органов центробежных пожарных насосов. Нанесение защитных покрытий на рабочие части насоса приводит к существенному увеличению их абразивостойкости и устойчивости к воздействию агрессивных сред.

Традиционно касательное напряжение в потоках однофазных сред находили экспериментальным путем или с использованием полужемпирических выражений. Поэтому разработка теоретических подходов на основе математических моделей и уравнений динамической скорости трения (касательного напряжения) в каналах как функции осредненной скорости жидкости, связанной с поверхностью трения эффектами смачивания, является достаточно актуальной проблемой.

Рассмотрим математическую модель для расчета динамической скорости трения, возникающего на твердых стенках в зависимости от скорости движения жидкости. Как известно [4], пограничный слой образуется на границе раздела твердое тело – жидкость при движении жидкости и оказывает влияние на гидродинамическое сопротивление при движении среды относительно твердого тела, перенос массы и тепла. Указанный тонкий слой называют, следуя Л. Прандтлю, пограничным слоем или слоем трения. Толщину пограничного слоя для случая безотрывного обтекания плоской пластины, можно приближенно определить, полагая, что внутри пограничного слоя силы инерции равны силам трения. Сила инерции, отнесенная к единице объема, равна

$$F_{ин} = \rho v \cdot \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (1)$$

Для пластины длиной L величина $\frac{\partial v}{\partial x}$ пропорциональна U/L , где U есть скорость внешнего течения. Следовательно, сила инерции имеет величину

порядка $\rho \cdot U^2/L$. С другой стороны, сила трения, отнесенная к единице объема, равна $\frac{\partial \tau}{\partial x}$ и при условии, что течение ламинарное,

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Градиент скорости в направлении, перпендикулярном к стенке, т. е. производная $\frac{\partial u}{\partial y}$, имеет величину порядка U/δ ; поэтому сила трения, отнесенная к единице объема, пропорциональна $\mu U/\delta$. Приравняв силу трения силе инерции и решив уравнение относительно δ , получим соотношение:

$$\delta = 5 \sqrt{\frac{\nu L}{u}} = \frac{5L}{\sqrt{\text{Re}}}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; 5 – коэффициент пропорциональности Блазиуса для ламинарного подслоя [5].

Из равенства (4) следует, что относительная толщина пограничного слоя δ/L уменьшается при увеличении числа Re пропорционально $(1/\text{Re})^{1/2}$, следовательно, при переходе к жидкости, лишенной трения, т. е. при переходе к $\text{Re} \rightarrow \infty$, пограничный слой исчезает. Кроме того, на толщину пограничного слоя существенно влияет гидрофобность на границе раздела фаз.

Отсюда следует, что, уменьшая коэффициент трения трущихся поверхностей, можно уменьшить энтропийную составляющую изобарно-изотермического потенциала и, соответственно, увеличить полезную мощность насоса. Выборочно нанося гидрофобные материалы с низкой поверхностной энергией на рабочие части пожарного насоса можно существенно влиять на радиальную и окружную составляющие скорости перекачиваемой воды.

Список литературы

1 **Ландау, Л. Д.** Статистическая физика : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау. – Т. 5, ч. 1. – М. : Физматлит, 2010. – 616 с.

2 **Абросимов, Ю. Г.** Гидравлика и противопожарное водоснабжение : учеб. / Ю. Г. Абросимов, А. И. Иванов, А. А. Качалов. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. – С. 82.

3 Проектирование и исследование характеристик ступеней динамических насосов : учеб. пособие / В. Н. Ивановский [и др.]. – М. : Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И. М. Губкина, 2015. – 104 с.

4 **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. Г. А. Вольперта. – М. : Наука, 1974. – 218 с.

5 Основы механики жидкости : учеб. пособие / В. Н. Белозерцев [и др.]. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 324 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ДОРОЖНЫЕ АСФАЛЬТОВЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ РЕМОНТА ДОРОГ

Е. М. ЖУКОВСКИЙ, М. Р. ШЕБЕКО

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Сегодня на дорогах образуется большое количество выбоин. Ключевая проблема состоит в том, что на скорость производительность ремонта выбоин не столь высокая, как это требуется [1]. Это объясняется тем, что используемые в настоящее время материалы и технологии не могут обеспечить заданные качественные показатели, что объясняет необходимость разработки материала для ремонта дорог, который позволит с большей производительностью произвести ремонт выбоин на дорожных покрытиях.

Наиболее перспективным для ямочного ремонта может стать использование дорожных асфальтовых композитов [2]. Данные материалы предназначены для ремонта отверстий и выбоин, заделки швов на покрытиях.

В состав данных композитов входят отходы нефтепереработки и горнодобывающей промышленности и специальные добавки. Соотношение материалов зависит от вида и размера дефектов, подлежащих ремонтам.

Данные композиты не требуют дополнительной подготовки (перемешивание, термостатирование и т. д.) перед использованием.

При обнаружении дефекта он заполняется ремонтным материалом с некоторым запасом на уплотнение. Уплотнение осуществляется под действием собственного веса рабочего, без использования уплотняющего оборудования.

Данные материалы могут использоваться дорожными организациями (зимнее содержание, патрульные осмотры), организациями коммунального хозяйства и организациями, имеющими площадки с покрытиями из асфальтобетона (дворы, проезды, парковки и т. д.), гражданами для ремонта покрытий «у ворот».

Список литературы

1 Современный ремонтный материал для устранения ямочности на дорожных покрытиях / Е. М. Жуковский [и др.] // Минск – Шанхай – Чанчунь: стратегия прорывного сотрудничества : сб. материалов науч.-практ. конф. (Минск, 21 апреля 2022 г.) / Беларус. нац. техн. ун-т. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 122–124.

2 ДАКPatch – материалы для ремонта дорог [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://dakpatch.by>. – Дата доступа : 20.03.2023.

ВЫБОР СОСТАВА ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПО АДГЕЗИОННЫМ КРИТЕРИЯМ

И. О. КАМОЛОВА, Р. Х. САЙДАХМЕДОВ

*Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан*

При обработке резанием труднообрабатываемых материалов происходит значительный износ инструмента в результате взаимодействия кобальтовой связки твердого сплава с обрабатываемым материалом под влиянием высоких температур, развивающихся в зоне резания. В процессе резания на участках соприкосновения инструмента с обрабатываемым материалом под влиянием локальных давлений происходит пластическая деформация, вследствие чего между ними устанавливаются адгезионные соединения. Исследования показывают, что во время резания металлические поверхности прижимаются, а затем разъединяются, в результате этого с поверхности инструмента переносятся металлические частицы, величина которых велика по сравнению с размерами атомов, на поверхность обрабатываемого материала или наоборот [1, 2]. В такой области контакта всегда образуются сильные связи и поверхность инструмента находится под действием срезающих напряжений. По этой причине частицы металла местами вырываются с поверхности, что приводит к выкрашиванию инструмента.

Для устранения адгезии используется СОЖ, но, когда скорость резания увеличивается, адсорбированные пленки не успевают возобновляться в зоне соприкосновения. Поры в контактных слоях под действием высоких температур размягчаются, область контакта становится сплошной и СОЖ не проникает в зону резания. Таким образом, снижается эффективность смазочно-охлаждающей жидкости. И когда речь идет о труднообрабатываемых материалах, таких как титановые сплавы, то износ инструмента происходит интенсивнее в связи с прочным схватыванием стружки к поверхности режущего инструмента.

Учитывая все вышесказанное, становится ясно, что инструмент, используемый при обработке титановых сплавов или труднообрабатываемых материалов должен иметь низкую адгезионную активность к этим материалам. Измерить силы сцепления или адгезионную активность материала напрямую невозможно или затруднено, поэтому за основу выбора материала режущего инструмента можно взять термодинамический критерий адгезии.

За основу адгезионного взаимодействия обрабатываемого материала и режущего инструмента можно выбрать термодинамический критерий оценки. Термодинамический критерий – это оценка свободной энергии образования ($\Delta G_{\text{обр}}$) химического соединения, которое возникает в зоне контакта. Работа адгезии напрямую связана со свободными энергиями образования этих соединений, чем более отрицательна $\Delta G_{\text{обр}}$ соединения, тем больше работа адгезии. Соответственно, взаимный адгезионный переход одного материала на другой при взаимодействии двух трущихся пар более вероятен. Для оценки адгезионного взаимодействия режущего инструмента и титановых сплавов рассмотрим свободную энергию образования некоторых соединений. Некоторые из них могут быть использованы в качестве режущего инструмента или как износостойкие покрытия на режущем инструменте. Для сравнения свободной энергии образования карбидов тугоплавких металлов ниже приведена таблица с количественными значениями $\Delta G_{\text{обр}}$, и по этим значениям был получен график (рисунок 1).

Таблица 1 – Свободные энергии образования ΔG^0 кДж/моль карбидов [2, 3]

Номер	Соединение	$-\Delta G^0$, кДж/моль	Номер	Соединение	$-\Delta G^0$, кДж/моль
1	WC	35,3	20	TaC _{1,0}	142,149
2	TiC _{1,0}	211,229	21	TaC _{0,95}	137,537
3	TiC _{0,95}	205,419	22	TaC _{0,9}	132,999
4	TiC _{0,9}	199,735	23	TaC _{0,85}	128,457
5	TiC _{0,85}	193,998	24	TaC _{0,8}	123,939
6	TiC _{0,8}	188,264	25	TaC _{0,75}	119,969
7	TiC _{0,75}	182,58	26	TaC _{0,7}	114,847
8	TiC _{0,7}	176,844	27	TaC _{0,65}	–
9	TiC _{0,65}	171,11	28	TaC _{0,6}	–
10	TiC _{0,6}	165,351	29	NbC _{1,0}	135,046
11	VC _{1,0}	99,233	30	NbC _{0,95}	132,866
12	VC _{0,95}	–	31	NbC _{0,9}	130,628
13	VC _{0,9}	102,259	32	NbC _{0,85}	128,254
14	VC _{0,85}	102,602	33	NbC _{0,8}	125,792
15	VC _{0,8}	95,516	34	NbC _{0,75}	123,171
16	VC _{0,75}	92,735	35	NbC _{0,7}	120,867
17	VC _{0,7}	91,323	36	NbC _{0,65}	–
18	VC _{0,65}	–	37	NbC _{0,6}	–
19	VC _{0,6}	–			

На основании анализа свободных энергий образования карбидов можно сделать вывод, что в качестве материала режущего инструмента для обработки титановых сплавов, исходя из термодинамического критерия, наиболее

лее целесообразно использовать карбиды вольфрама, так как они обладают наиболее малой свободной энергией и, как следствие, наиболее низкой адгезией с обрабатываемым материалом.

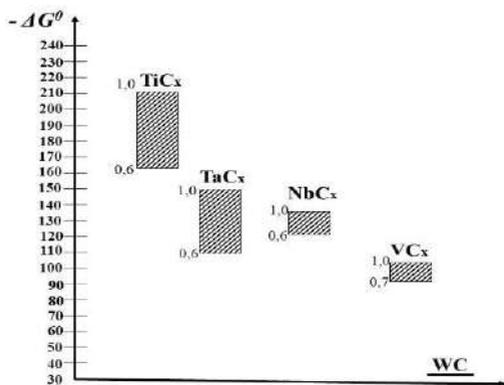


Рисунок 1 – Свободные энергии $\Delta G^\circ_{\text{обр}}$ для карбидов при стандартных условиях

Список литературы

- 1 **Аппен, А. А.** Температурустойчивые неорганические покрытия / А. А. Аппен. – М. : Машиностроение, 1983. – 296 с.
- 2 **Шустер, Л. Ш.** Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л. Ш. Шустер. – М. : Машиностроение, 1988. – 95 с.
- 3 **Турчанин, А. Г.** Термодинамика тугоплавких карбидов и карбонитридов / А. Г. Турчанин, М. А. Турчанин. – М. : Metallurgia, 1991. – 362 с.

УДК 621.336.22:004.94

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКОСЪЕМНИКОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. И. КАПЛЮК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Надежность и энергосбережение процесса токосъема на электрифицированном железнодорожном транспорте зависят от стабильности контакта между токосъемным устройством и проводом электросети. Передача электроэнергии в сильноточном скользящем контакте характеризуется длительным воздействием тока, эксплуатационными и климатическими условиями, сопровождающимися процессами трения и изнашиванием контактирующих

элементов. Многообразие влияющих факторов, не подчиняющихся простым законам, приводит к поиску фундаментальных причин износа в паре трения «контактный провод электросети – контактная вставка токосъемника» с целью продления ресурса контактного провода.

Внедрение инновационных ресурсосберегающих технологий в производство токосъемных пластин позволяет повысить качество токосъема и уменьшить износ дорогостоящих материалов. Перспективным направлением в этой области является использование композитов в конструкции токоприемников (для рам, контактных вставок, каретки, полозов и др.) [1, 2].

Применение композиционных материалов для конструирования несущей части токосъемников приводит к снижению веса и улучшению аэродинамических характеристик самого токосъемного устройства.

В эксплуатации токосъемных вставок в настоящее время широко распространены контактные токосъемные вставки на основе углерода без металла (угольные), на основе углерода с содержанием металла (металлокерамические), а также на углеродной основе с пропиткой металлом после обжига (композитные). В состав большинства контактных самосмазывающихся материалов полностью или частично входит углерод в различных его формах (графит, сажа, кокс и др.), что обеспечивает достаточно низкое трение с сохранением коммунтирующих свойств в контакте.

По всем требованиям, предъявляемым к контактным вставкам, наиболее рациональное использование данной пары трения связано с разработкой токосъемных пластин на основе углерод-металлосодержащих композиций. Комбинируя компоненты композитного материала для токосъемных вставок, добиваются свойств, обеспечивающих наиболее удовлетворительные условия для скользящего сильноточного контакта (в отличие от чистых металлов и их сплавов).

К изделиям массового производства из композиционных материалов типа псевдосплавов для токосъемников относятся металлокерамические вставки. Их достоинство в том, что серебряная или медная фаза обуславливает высокую электрическую проводимость и теплопроводность контакта, а включения тугоплавкой фазы повышают стойкость к механическому износу, электрической эрозии и свариванию. Таким образом, они наиболее удовлетворяют условиям сильноточного разрывного контакта при возникновении электрической дуги.

В целях экономии дефицитных материалов широкое распространение получила замена цельнометаллических контактных элементов слоистыми.

Специфическую группу композиционных контактных материалов образуют материалы, получаемые методом пропитки. Композиты с жидкими металлами сочетают в себе достоинства как твердых, так и жидких контактов: твердый каркас придает контакту механическую прочность и независимость рабочих характеристик от положения в пространстве, а жидкий ме-

талл обеспечивает малое переходное сопротивление, независимо от контактного нажатия, и исключает свариваемость.

Для работы при высоких электрических и механических нагрузках и скоростных режимах используются композитные материалы с металлической матрицей и функциональным наполнителем. Металлическая матрица служит каркасом, воспринимающим механическую нагрузку, а наполнитель обеспечивает необходимые электрические и тепловые свойства.

Также в современном электрооборудовании находят применение контактные материалы на полимерной матрице и материалы на основе углеродных волокон, которые повышают прочность, жесткость и износостойкость контактной поверхности.

В работе решалась задача определения влияния свойств материала токосъемной пластины на износ контактного провода на основе разработки и анализа конечно-элементных моделей контактирующих элементов токосъемной пары «контактный провод – токосъемная вставка» в среде пакета инженерного анализа ANSYS. Данное программное обеспечение позволяет рассматривать механическую нагрузку совместно с тепловыми и электрическими свойствами материала, решая широкий спектр контактных задач в области инженерии.

В качестве исходных данных в конечно-элементных моделях использовались основные свойства материала контактных вставок и контактного провода (плотность, модуль упругости, удельное электрическое сопротивление и удельная теплопроводность материала) [3, 4].

Конечно-элементные модели пары трения «контактный провод – токосъемная вставка» создавались в следующей последовательности: исследование механических свойств контактируемых материалов, исследование свойств контакта в процессе нагревания, вызванного трением и исследование влияния протекания электрического тока в контакте. Сила натяжения провода принята равной 500 Н, сила прижатия вставки к проводу – 140 Н.

Разработанные конечно-элементные модели демонстрируют соответствие реализуемым на практике значениям и позволяют установить значения напряжений, возникающих в токосъемной вставке токоприемника при ее скольжении по проводу при заданных силах натяжения провода и прижатия вставки к проводу; оценить изнашивание контактного провода и вставки токосъемника посредством влияния сил трения, действующих между контактирующими поверхностями; получить распределения температуры в контактирующих элементах от фрикционного нагрева и от теплопередачи между нагретой токосъемной вставкой к контактным проводам; произвести комплексную оценку влияния связанных полей напряжений и температур контактирующих тел при их относительном смещении; выполнить анализ задачи о протекании тока через скользящий контакт между контактным

проводом и токоприемником с учетом силы прижатия; использовать их в качестве исходных данных для последующего анализа, а также для усовершенствования конструкции узла токосъема.

Сравнительный анализ угольной токосъемной вставки с металлокерамической на основе разработанных моделей показал, что вставка из композитного материала лучше обеспечивает механические прочностные показатели при сохранении высокой электропроводности.

Список литературы

1 **Mańka, A.** Influence of copper content on pantograph contact strip material on maximum temperature of railroad wire / A. Mańka, A. Hełka, J. Ćwiek // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2020. – Vol. 106. – P. 97–105.

2 **Михайлов, М. С.** Применение алюмоматричных композиционных материалов в конструкции токоприемников электроподвижного состава / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 76–84.

3 **Shimanovsky, A. O.** Finite Element Modeling of the Locomotive Pantograph – Contact Wire Interaction / A. O. Shimanovsky, I. I. Kapliuk // Mechanika. – 2018. – Vol. 23. – P. 145–149.

4 **Каплюк, И. И.** Моделирование контактного взаимодействия токосъемника и контактного провода с учетом тепловых процессов / И. И. Каплюк // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Вып. 7. – С. 46–48.

УДК 621.8

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОНТАКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

С. В. КИРГИНЦЕВА, В. В. МОЖАРОВСКИЙ

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
Республика Беларусь*

Целью расчета подшипника сухого трения является установление допустимых значений действующей нагрузки, скорости скольжения, температуры и других параметров и их соответствия физико-механическим свойствам выбранных материалов пары трения «втулка – вал» при принятых геометрических соотношениях, обеспечивающих наибольший срок службы и достаточно высокие антифрикционные свойства, получение наибольшей износостойкости подшипника. Наиболее широко для изготовления подшипников скольжения применяются композиционные материалы на основе фенольных и полиамидных смол, а также армированные волокнистые. Они имеют хорошие механические свойства, малый удельный вес, высокие динамические свойства, низкие коэффициенты трения. Расчет втулок при контактом взаимодействии в основном построен на изотропных свойствах

материала. Но современные волокнистые композиты имеют выраженную анизотропию механических свойств. Эти особенности необходимо учитывать при расчете и конструировании подшипников скольжения. При сухом и граничном трении подшипники можно рассчитывать по удельному давлению. В данной работе предлагается математическая модель расчета контактного взаимодействия системы «вал – втулка из волокнистого материала» с использованием в основе математической теории упругости анизотропного тела. При использовании волокнистых композитов в качестве материала для втулки можно расположить волокна тремя способами: перпендикулярно оси втулки, радиально и параллельно. Для иллюстрации расчета рассматриваем пример расположения волокон как на рисунке 1.

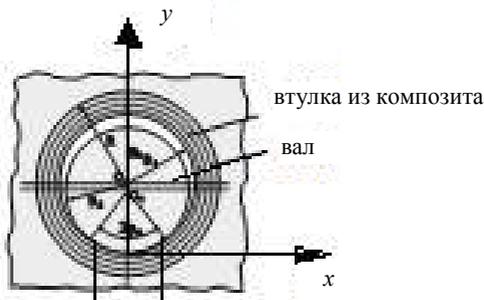


Рисунок 1 – Продольное скольжение вала вдоль волокон

Механические свойства (модули упругости, коэф. Пуассона) и основные уравнения для описания контактного взаимодействия представлены в работе [1]. Для определения контактных параметров (давление, зона контакта, напряжения и т. д.) можно пользоваться модифицированным решением типа Г. Герца для случая внутреннего касания цилиндров.

Рассмотрим композиционный материал, армированный волокнами, которые ориентированы в направлении одной из осей X или Y (координатные оси совпадают с основными направлениями материала).

Представим расчет напряженного состояния ортотропного тела, при взаимодействии вала и втулки композита, подверженного воздействию поверхностного давления p , распределенного в соответствии с законом

$$p(x) = p_0 \sqrt{a^2 - x^2}, \quad p_0 = 2P / (L\pi a^2),$$

или согласно [1] $p(x) = m \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \sqrt{a^2 - x^2}$, где R_1 и R_2 – радиусы двух взаимодействующих – втулки и цилиндра (мм); P и L – действующее усилие и длина цилиндра, параметр $m = [((\beta_1 + \beta_2)S_{22})^{(1)} + ((\beta_1 + \beta_2)S_{22})^{(2)}]^{-1}$,

индексы (1) и (2) характеризуют материалы двух цилиндров, величины $\beta_{1,2}$ для каждого цилиндра вычисляются по формулам [1]

$$\beta_{1,2} = \left(\frac{S_{66} + 2S_{12} \pm \sqrt{S_{66}^2 + 2S_{12}^2 - 4S_{11}S_{22}}}{2S_{11}} \right)^{-1},$$

где постоянные $S_{i,j}$ при плоской деформации определяются из [1] следующим образом:

$$S_{11} = (1 - \nu_{13}\nu_{31}) / E_1, S_{12} = -(\nu_{12} + \nu_{13}\nu_{31}) / E_1, S_{22} = (1 - \nu_{32}\nu_{23}) / E_2, S_{66} = 1 / G_{12},$$

индексы i, j технических постоянных материалов цилиндров (модуля упругости E (МПа), коэффициента Пуассона ν и модуля сдвига G (МПа)) характеризуют различные направления и вычисляются по зависимостям по правилу

$$\text{смесей: } E_1 = VE_f + (1-V)E_m, E_2 = \frac{E_m(1+\eta V)}{1-\eta V}, G_{12} = G_m \frac{G_f(1+V) + G_m(1-V)}{G_f(1-V) + G_m(1+V)},$$

$$\eta = (E_f - E_m) / (E_f + E_m); \quad \nu_{12} = \nu_{13} = V\nu_f + (1-V)\nu_m, \nu_{21} = \nu_{31} = E_2 / E_1 \nu_{12},$$

$$K = K_f K_m / (VK_m + (1-V)K_f), K_{f,m} = E_{f,m} / (3 - 6\nu_{f,m}), K_m = E_m / (3 - 6\nu_m);$$

индексы f и m обозначают волокно и матрицу соответственно; V – объемное содержание волокна в матрице материала; K_f, K_m – объемные модули упругости волокна и матрицы. Величина зоны контакта:

$$a = \sqrt{\frac{2PR_1R_2}{\pi mL(R_1 - R_2)}}.$$

Для оценки применимости формул, определяющих параметры контакта для внутреннего взаимодействия изотропного цилиндра с ортотропной втулкой, нужно оценить применимость представленных формул аналогично тому, как это сделано в работе [2] для малых зон контакта, в которой дан критерий применимости формул для задачи Герца для малых областей контакта взаимодействующих изотропных тел. Для оценки применимости формулы примем, что $\alpha = R \sin \alpha_0$, $x = R \sin \alpha$, α_0 – угол контакта. Здесь P – линейная нагрузка. Тогда

$$Qk_1 = \sin^2 \alpha_0, \text{ где } Q = P / (\varepsilon E_1), \varepsilon = R_2 - R_1, k_1 = 2(\beta_1 + \beta_2)(1 - \nu_{23}\nu_{32}) / \pi,$$

$$Pk_1 = \sqrt{\sin^2 \alpha_0 - \sin^2 \alpha}, \text{ где } P_1 = p(x)R\pi / (2\varepsilon E_1).$$

Расчеты показали, что результаты применимости формул будут от $\alpha_0 = \pi / 18$ до $\alpha_0 = \pi / 9$.

Расчетный пример: Подшипниковый узел трения без смазки состоит из стального вала и втулки, выполненной из композита Gr/Al со следующими характеристиками: $E_f = 380$ ГПа, $E_m = 70$ ГПа, $\nu_f = 0,2$, $\nu_m = 0,34$, $G_f = 13$ ГПа, $G_m = 26$ ГПа (для упрощения расчета считаем, что вал абсолютно жесткий). На рисунке 2 показаны графики зависимости Q/k_1 и Q/k_1 от α_0 , а также распределение давления в зоне контакта P_1/k_1 и P_1/k_1 при различных содержаниях волокон в матрице композиционного материала.

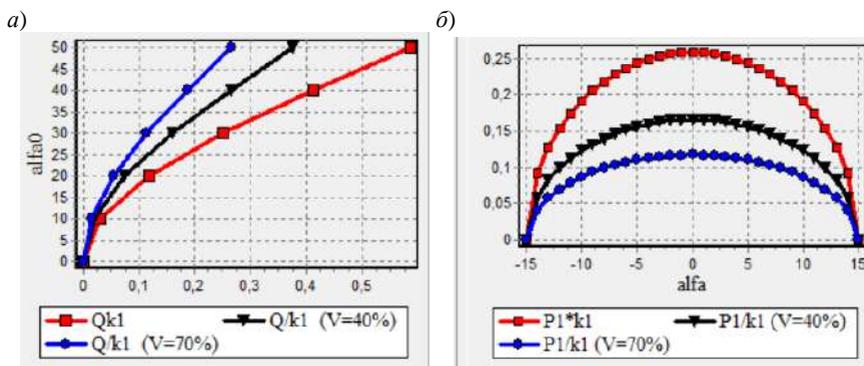


Рисунок 2 – Графики зависимости:

а – Q/k_1 и Q/k_1 от угла контакта α_0 ; б – распределение давления в зоне контакта

Список литературы

- 1 **Можаровский, В. В.** Прикладная механика слоистых тел из композитов / В. В. Можаровский, В. Е. Старжинский. – Минск : Наука и техника, 1988. – 280 с.
- 2 **Панасюк, В. В.** Деякі контактні задачі теорії пружності / В. В. Панасюк, М. Й. Теплий. – Київ : Наукова думка, 1975. – 195 с.

УДК 539.3

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБ ИЗГИБЕ КРУГОВОЙ НАГРУЗКОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ, СВЯЗАННОЙ С УПРУГИМ ОСНОВАНИЕМ

А. Г. КОЗЕЛ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Трехслойные пластины в основном состоят из двух жестких внешних слоев, прикрепленных к легкому толстому срединному слою (заполнителю). В последнее время слоистые композиты широко используются в машино- и приборостроении, благодаря высокой жесткости на изгиб и прочности при относи-

тельном небольшом весе, хорошему шумоподавлению и изоляции. В статьях [1–4] получены решения ряда задач статики и динамики композитных конструкций при комплексных силовых и температурных воздействиях.

В данной работе приведена постановка краевой задачи об осесимметричном изгибе круглой трехслойной пластины, связанной с упругим основанием, под действием локальной нагрузки. Принимается гипотеза ломаной линии: гипотезы Кирхгофа для тонких и жёстких внешних слоёв, модель Тимошенко для лёгкого несжимаемого по толщине срединного слоя. Постановка задачи проводится в цилиндрической системе координат r, φ, z , связанной со срединной плоскостью заполнителя. Решение краевой задачи сведено к определению: прогиба пластины $w(r)$, относительного сдвига в заполнителе $\psi(r)$ и радиального перемещения координатной плоскости $u(r)$. Реакция упругого основания принимается согласно модели Пастернака [3]:

$$q_R(r) = -\kappa_0 w + t_f \left(w_{,rr} + \frac{1}{r} w_{,r} \right), \quad (1)$$

где κ_0, t_f – коэффициенты сжатия и сдвига основания; запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по координате r .

Пусть на верхний слой рассматриваемой композитной пластины действует поперечная локальная осесимметричная нагрузка $q(r)$, равномерно распределенная внутри круга радиусом $b \leq R$, где R – радиус пластины. Для её аналитического описания используем функцию Хевисайда $H_0(r)$:

$$q(r) = q_0 H_0(b-r), \quad q_0 = \text{const}. \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений равновесия, полученная ранее для сплошных нагрузок в [5], с учетом (1) и (2) принимает вид

$$\begin{aligned} L_2 (a_1 u + a_2 \psi - a_3 w_{,r}) &= 0, \\ L_2 (a_2 u + a_4 \psi - a_5 w_{,r}) &= 0, \\ L_3 (a_3 u + a_5 \psi - a_6 w_{,r}) - \kappa_0 w + t_f \Delta w &= -q_0 H_0(b-r), \end{aligned} \quad (3)$$

где a_i – коэффициенты

$$a_1 = \sum_{k=1}^3 h_k K_k^+, \quad a_2 = c(h_1 K_1^+ - h_2 K_2^+), \quad a_3 = h_1 \left(c + \frac{1}{2} h_1 \right) K_1^+ - h_2 \left(c + \frac{1}{2} h_2 \right) K_2^+,$$

$$a_4 = c^2 \left(h_1 K_1^+ + h_2 K_2^+ + \frac{2}{3} c K_3^+ \right),$$

$$a_5 = c \left[h_1 \left(c + \frac{1}{2} h_1 \right) K_1^+ + h_2 \left(c + \frac{1}{2} h_2 \right) K_2^+ + \frac{2}{3} c^2 K_3^+ \right],$$

$$a_6 = h_1 \left(c^2 + c h_1 + \frac{1}{3} h_1^2 \right) K_1^+ + h_2 \left(c^2 + c h_2 + \frac{1}{3} h_2^2 \right) K_2^+ + \frac{2}{3} c^3 K_3^+,$$

$$K_k^+ \equiv K_k + \frac{4}{3} G_k, \quad K_k^- \equiv K_k - \frac{4}{3} G_k, \quad h_k - \text{толщина } (h_3 = 2c),$$

G_k, K_k – модули сдвиговой и объемной деформации k -го слоя, L_2, L_3 – дифференциальные операторы

$$L_2(g) \equiv \left(\frac{1}{r} (rg)_{,r} \right)_{,r} \equiv g_{,rr} + \frac{g_{,r}}{r} - \frac{g}{r^2},$$

$$L_3(g) \equiv \frac{1}{r} r L_2(g)_{,r} \equiv g_{,rrr} + \frac{2g_{,rr}}{r} - \frac{g_{,r}}{r^2} + \frac{g}{r^3}.$$

Решение краевой задачи по определению напряженно-деформированного состояния круговой трехслойной пластины на упругом основании в случае поперечной локальной осесимметричной нагрузки получено с учетом присоединения к системе уравнений (3) силовых или кинематических граничных условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т22М-072).

Список литературы

1 **Нестерович, А. В.** Неосесимметричное термосиловое деформирование круговой трехслойной пластины / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 2 (27). – С. 54–60.

2 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1 (22). – С. 31–35.

3 **Маркова, М. В.** Вынужденные колебания круговой трёхслойной пластины ступенчато-переменной толщины, побуждаемые ударным воздействием / М. В. Маркова // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 28–36.

4 **Козел, А. Г.** Термоупругий изгиб круговой трехслойной пластины, связанной с основанием Пастернака / А. Г. Козел // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 31–37.

5 **Старовойтов, Э. И.** Влияние жесткости основания Пастернака на деформирование круговой трёхслойной пластины / Э. И. Старовойтов, А. Г. Козел // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 2. – С. 106–113.

УДК 620.168

КОМПОЗИТНЫЕ ШПАЛЫ

А. Р. КОНОВАЛОВА, Д. И. ПОНАМАРЕНКО

*Самарский государственный университет путей сообщения,
Российская Федерация*

Наиболее опасная экологическая угроза для нашей планеты – захламление ее пластмассовыми отходами. Одним из решений этой проблемы служит организация производств по переработке вторичного сырья. Для железнодорожной сферы в России – это очень актуально, так как наша страна состоит в пятерке мировых рекорсменов, имеющих самую протяженную сеть железных дорог.

Верхнее строение пути включает в себя такой элемент, как шпалы. Основными материалами, из которых изготавливают шпалы, являются дерево и железобетон. Древесину предпочитают, потому что она имеет лучшие амортизационные свойства, и такие шпалы относительно легко устанавливать и заменять, но они очень подвержены гниению. Срок службы таких шпал можно продлить за счет использования различных консервантов, но они создают потенциальную опасность для окружающей среды. Железобетонные шпалы имеют повышенную электропроводность, чувствительность к ударам, восприимчивость к перепадам температур, а главное – сложность монтажа.

Отличной альтернативой деревянным и железобетонным шпалам являются композитные: срок службы композитных шпал до 50 лет, повышенная стойкость к климатическим изменениям, высокое удельное электрическое сопротивление, экологически безопасны, возможность повторной переработки и использования, не требуют новых технологий и оборудования по замене и монтажу.

Для изготовления композитных шпал можно применять различные технологии производства, в основе которых будет лежать обработка заранее подготовленной смеси переработанного вторичного сырья, асфальтового компонента и армирующего материала. Пригодный для использования пластмассовый компонент можно выбирать из широкого ассортимента [1].

Чтобы проверить, отвечают ли полимерные композиционные шпалы требованиям достаточной прочности, было проведено испытание в системе автоматизированного проектирования SolidWorks.

Статический расчет. Предварительно упростим наши расчеты. Вместо всей сборки, представленной на рисунке 1, рассчитаем только одну шпалу. Заменим рельсы с накладками на вырез с точным посадочным местом и начнем на него прикладывать нагрузку, которая будет симулировать вес поезда в статичном положении. Шпалу, отобранную для испытания на возникающие напряжения, испытывают последовательно в обоих подрельсовых сечениях по схеме, показанной на рисунке 2 [2, 9].



Рисунок 1

Результаты исследования показали, что композитные шпалы выдерживают напряжения, передаваемые колесными парами поезда в неподвижном состоянии на рельсы.

Динамический расчет (рисунок 3). При проведении расчета выставим количество частот, равное 3 герцам. Это объясняется тем, что нам необхо-

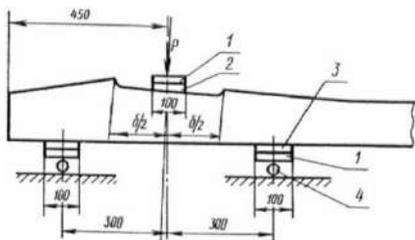


Рисунок 2

по всем осям составило 1. Считаем балластное покрытие идеальным, поэтому применяем зафиксированную геометрию к нижней части шпалы. Прикладываем динамическую нагрузку в посадочные места. Величину силы берем из [3, 3]: «...для пропуска пассажирских поездов со скоростью до 200 км/ч включительно и грузовых поездов со скоростью до 120 км/ч включительно с вагонами, имеющими статические осевые нагрузки до 245 кН/ось (25 тс/ось) и погонные по осям сцепления до 102,9 кН/м (10,5 тс/м), динамическую нагрузку на железнодорожный путь от тележки до 167,6 кН/м (17,1 тс/м).

димо, чтобы массовое участие нашей сборки было около 95 %. Если не соблюдать данное условие, мы получим некорректные данные.

Для проверки массового участия запускаем Simulation, «Частота 1» и расчет (рисунок 4). Проверяем соблюдение условий, при необходимости изменяем частоту. В нашем случае массовое участие

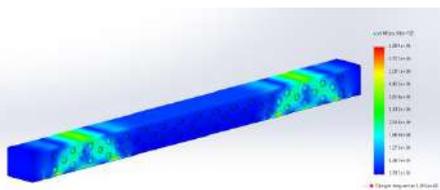


Рисунок 3

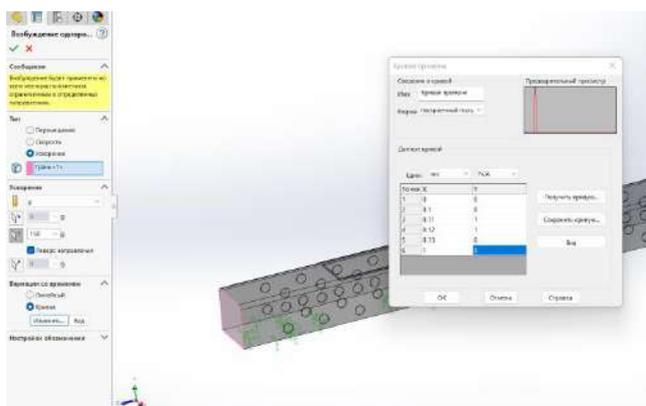


Рисунок 4

При этом земляное полотно вновь строящихся железнодорожных линий для грузового и смешанного движения поездов рассчитывается под нагрузку на ось грузового вагона 294 кН (30 тс/ось) и динамическую нагрузку на железнодорожный путь от тележки 201 кН/м (20,5 тс/м)». Проверяем диапа-

зон времени, необходимо, чтобы он совпадал со временем графика нагрузки. Была выставлена кривая времени и настроены параметры действия.

После расчета частоты проверим пик отклика. Его определяем из диаграммы в модальном анализе. Видно, где наибольшее перемещение, там и наибольшее ускорение (рисунок 5). Необходимая нам точка находится в середине балки, выберем ее, для этого выводим график отклика. По графику определяем, достаточен ли шаг по времени. Если график затухания плавный, то оставляем все, как есть. Установим возбуждение основания «Ускорение» – «g», выполняем расчет. Определяем деформацию балки под нагрузками, а также напряжения.

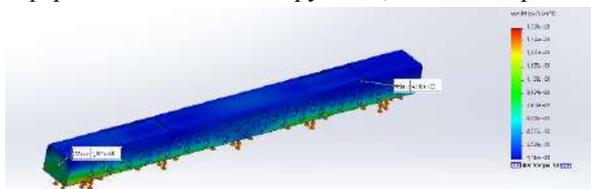


Рисунок 5

Из приведенных выше расчетов и исследований можно понять, что композитные шпалы доказывают свою эффективность и работоспособность. Также следует отметить, что они предполагают снижение шума и вибрации, вследствие чего уменьшаются разрушения железнодорожного полотна, минимизируется текущее обслуживание и сократится количество ремонтов.

Список литературы

1 Композиция и способ для производства железнодорожных шпал: пат. RU2540641C2 / Брайан Абрамсон, Джеймс Р. Инглис. – Оpubл. 10.02.2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://patents.google.com/patent/RU2540641C2/ru>. – С. 9. – Дата доступа : 24.03.2023.

2 ГОСТ 21174–75. Шпалы железобетонные предварительно напряженные для трамвайных путей широкой колеи. – Введ. 1976-07-01. – М. : Изд-во Стандартов. – С. 8–11.

3 СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. – С. 3.

УДК 614.8

РАБОТА ТРЕНАЖЕРА «ПОЖАРНЫЙ НАСОС» НА СОВРЕМЕННОЙ ПРИБОРНОЙ БАЗЕ

В. В. КОПЫТКОВ

*Филиал «Институт профессионального образования»
Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Гомель*

Б. Е. ЖАКИПБАЕВ

*Университет дружбы народов им. академика А. Куатбекова, г. Шымкент,
Республика Казахстан*

Для успешной борьбы с пожарами и их последствиями, наряду с целым комплексом мер обеспечения пожарной безопасности, необходимо решить важную задачу – довести до автоматизма навыки работы водителей при ра-

Общая схема управления представлена на рисунке 2, а внешний вид разработанного стенда на рисунке 3.

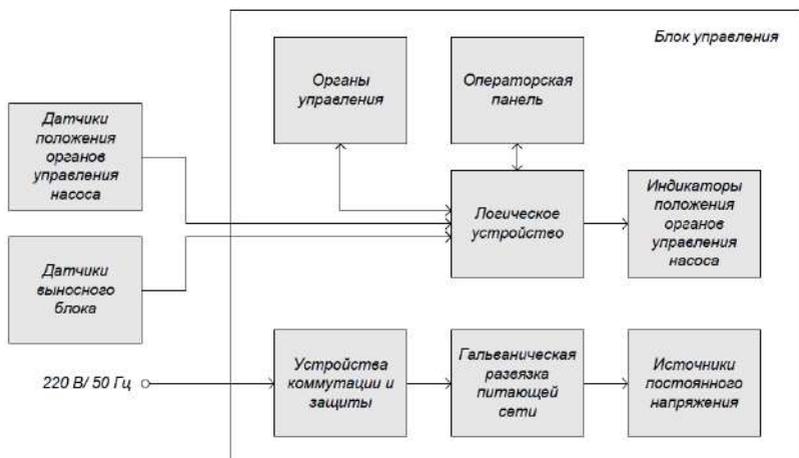


Рисунок 2 – Общая схема управления



Рисунок 3 – Внешний вид разработанного тренажера

Использование разработанного тренажера позволяет повысить навыки водителей без использования автоцистерн и снизить финансовые затраты на амортизацию пожарных автомобилей и топливо.

УДК 620.22;678.6

ПОЛУЧЕНИЕ И НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ ПОЛИАМИДА 6 С АЛИФАТИЧЕСКИМ ПОЛИКЕТОНОМ

Ю. М. КРИВОГУЗ, В. Н. УСОВА, В. Н. КОВАЛЬ

*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь*

В решении задачи создания новых материалов для машиностроения с нужным комплексом свойств важная роль принадлежит смесям полимеров. В настоящее время смешение полимеров стало одним из перспективных и экономичных направлений модифицирования исходных полимеров, не требующих создания новых капитальных производств [1–6].

Разнообразные свойства полимерных смесей определяются не только возможностью варьирования природой и содержанием полимеров в них, но и способностью полимерных компонентов к взаимодействиям на границах раздела фаз [1, 2, 4]. Известно, что полиамид 6 (ПА6), содержащий в структуре макромолекул –NH и –NH₂ – группы, способен к формированию различных по природе связей (ковалентных, водородных и др.) и взаимодействий (диполь-дипольных и др.) с макромолекулами алифатических поликетонов (АПК), благодаря наличию у них –C = O – групп [7]. В связи с этим представляло большой научный интерес исследование влияния состава смеси ПА6 и АПК на свойства конечных бинарных композиций с учетом взаимодействий между данными полимерными компонентами.

В настоящей работе объектами исследования служили ПА6 (марка для контакта с пищевыми продуктами производства ОАО «Гродно-Азот», РБ), АПК (марка M710F производства фирмы «Hyosung Corporation», Ю. Корея).

Для получения бинарных смесей ПА6 с АПК их грануляты смешивались в двухлопастном смесителе. Предварительно грануляты высушивались до остаточной влажности не более 0,1 %. Далее полученные механические смеси компонентов помещались в загрузочный бункер двухшнекового экс-трудера TSSK-35/40 (диаметр шнеков 35 мм, отношение L/D = 40, число независимых зон обогрева материального цилиндра – 10) и подвергались соэкструзии в расплаве при производительности ≈ 50 кг/час. Температурные

режимы в основных зонах смешения материального цилиндра экструдера соответствовали температурным режимам, установленным для экструзии ПА6. Из материального цилиндра расплав экструдатов выдавливался через фильеру в виде четырех стренг диаметром 3–4 мм, подвергался водяному охлаждению, обдуву подогретым воздухом и гранулированию на грануляторе роторного типа. Концентрация АПК в смесях с ПА6 варьировалась в интервале от 5 до 50 мас. %.

Затем из полученных материалов на термопластавтомате EN-30 (Тайвань, объем впрыска 30 см³) отливались экспериментальные образцы для определения их свойств с использованием стандартных литьевых форм.

Об изменениях свойств смесей ПА6 с АПК судили по результатам механических испытаний, а также по данным релаксационной спектроскопии.

В таблице 1 представлены результаты испытаний механических свойств исследуемых бинарных смесей ПА6 с АПК.

Таблица 1 – Показатели свойств смесевых композитов на основе ПА6 и АПК

Состав смесевых композитов, мас. %	G_p, Γ Па	$\sigma_t,$ МПа	$\epsilon_p,$ %	$K_c,$ %	$a_{KB},$ кДж/м ²	$a_{KA},$ кДж/м ²
ПА6	2,5	65,5	268,2	90,6	11,0	11,0
АПК	1,2	45,0	277,0	98,0	19,3	24,5
ПА6/АПК – 5 %	2,3	60,0	61,3	88,8	24,5	20,0
ПА6/АПК – 10 %	2,1	54,4	78,0	87,0	14,0	10,6
ПА6/АПК – 15 %	2,1	55,2	43,2	91,0	19,0	14,0
ПА6/АПК – 25 %	1,7	47,6	61,0	93,0	18,0	15,3
ПА6/АПК – 50 %	1,3	47,0	143,0	–	42,0	36,3

Сравнительный анализ механических свойств исследуемых смесей показал, что введение АПК в ПА6 приводит к снижению его модуля упругости (G_p), предела текучести (σ_t) и относительного удлинения при растяжении (ϵ_p) в соответствии с правилом аддитивности для полимерных смесей. В то же время, величина коэффициента прочности спая (K_c) повышается с ростом концентрации АПК в смесях с ПА6, что свидетельствует об интенсификации межфазных взаимодействий между полимерными компонентами. Несмотря на то, что значения G_p и σ_t для ПА6/АПК композиций уменьшаются, для всех исследуемых составов они выше, чем у исходного АПК, и сохраняются на уровне ряда конструкционных термопластов, находящихся применение в машиностроении (см. таблицу 1).

Из сопоставления данных, отображенных в таблице, также видно, что смеси ПА6/АПК характеризуются повышенными значениями ударной вязкости на образцах с острым (a_{KB}) и прямоугольным (a_{KA}) надрезами по сравнению с исходным ПА6. При этом важно отметить, что добавка АПК в ко-

личестве 50 мас. % повышает ударную вязкость ПА6 в 3,3–3,8 раза в зависимости от типа надреза. Причина такого значительного роста ударопрочности полиамидных смесей, содержащих АПК в количестве 50 мас. %, может быть связана с формированием оптимальной фазовой структуры и ростом интенсивности межфазных взаимодействий, что в совокупности способствует увеличению степени диссипации механической энергии, приложенной к материалу.

Подтверждением интенсификации межфазного взаимодействия в смесях ПА6 с АПК являются результаты их анализа методом релаксационной спектроскопии. Установлено, что в данных смесях тангенс угла механических потерь ($\text{tg}\delta$) при температуре стеклования ПА6 (30,5 °С) в присутствии АПК смещается в сторону более низких температур и обобществляется с пиком стеклования (7,0 °С) АПК. Показано, что смешение ПА6 с АПК приводит к снижению значений $\text{tg}\delta$ в области стеклования полимерных компонентов, что является следствием уменьшения подвижности сегментов полимерных цепей.

Отмеченные изменения в релаксационных спектрах, а также изменения пиков температур релаксационных переходов с большой долей вероятности можно связать с повышением энергии взаимодействия на границах раздела фаз в смесях ПА6 с АПК [8].

Список литературы

- 1 Кулезнев, В. Н. Смеси полимеров / В. Н. Кулезнев. – М. : Химия, 1980. – 304 с.
- 2 Песецкий, С. С. Смесевые полиамидные композиции и технологии их получения (обзор) / С. С. Песецкий, А. А. Богославский // Материалы. Технологии. Инструменты. – 1999. – № 2. – С. 27–38.
- 3 Песецкий, С. С. Полимерные композиты технического назначения / С. С. Песецкий // Наука и инновации. – 2013. – № 9. – С. 7–10.
- 4 Utracki, L. A. Polymer Blends Handbook / L. A. Utracki, Ch. A. Wilkie. – Dordrecht : Springer Science, 2014. – 2378 p.
- 5 Utracki, L. A. History of commercial polymer alloys and blends (From perspective of the patent literature) / L. A. Utracki // Polym. Eng. Sci. – 1995. – Vol. 35, № 1. – P. 2–17.
- 6 Utracki, L. A. Commercial Polymer Blends / L. A. Utracki – New York : Chapman and Hall, 1998. – 720 p.
- 7 High impact strength of aliphatic polyketone/polyamide 6 blends induced by a chemical reaction [Electronic resource] / Hong Gu Kwon [et al.] // Journal of Elastomers and Plastics. – 2023. – Mode of access : <https://doi.org/10.1177/00952443231158781>. – Date of access : 28.03.2023.
- 8 Бартнев, Г. М. Релаксационная спектроскопия полимеров / Г. М. Бартнев, А. Б. Бартнева. – М. : Химия, 1992. – 383 с.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТРАНСПОРТНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Е. Ф. КУДИНА^{1,2}, И. В. ПРИХОДЬКО¹,

П. А. КУРИЦЫН¹, Г. Р. ГОНЧАРОВ¹, П. А. ПРИЩЕЛОВ¹

¹Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель;

*²Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

Современный подвижной состав представляет собой сложную, многофункциональную систему, и значительное развитие железнодорожного транспорта в последние десятилетия связано с ростом скоростей движения, использованием тягового оборудования больших мощностей, применением систем контроля и управления на базе микропроцессорной техники. В какой-то мере это стало возможно благодаря использованию полимерных композитов с высокими физико-механическими свойствами. Также важно учесть, что эксплуатация этого оборудования в реальных условиях осложняется комплексным воздействием внешних факторов, таких как высокие и низкие температуры, вибрация, электромагнитные поля, от которых зависит продолжительность работы как отдельного устройства, так и всего объекта в целом. Поэтому и к композиционным материалам (КМ) должны предъявляться особые требования с точки зрения устойчивости к внешним воздействиям и длительности эксплуатации.

В настоящее время разработаны полимерные композиционные материалы (ПКМ) многоцелевого функционального назначения на основе терморезистивных матриц с использованием различных наполнителей, пластификаторов и специальных добавок. Но тем не менее остаются актуальными задачи расширения номенклатуры материалов, не уступающих по свойствам отечественным и зарубежным аналогам и позволяющих их эксплуатировать в условиях комплексного динамического воздействия.

При создании КМ, являющихся многокомпонентными структурами, важное место отводится матрице, которая обеспечивает монолитность материала и обуславливает его основные эксплуатационные характеристики. В качестве связующих ведущие позиции занимают составы на основе смесей с компонентами, оптимизирующими их технологические и эксплуатационные свойства [1]. Основные виды применяемых на сегодняшний день реактопластов приведены на рисунке 1. Следует отметить, что в отличие от терморезистивных полимеров на основе полиэфирных, фенолформальдегидных, мочевино- и меламиноформальдегидных смол, которые выделяют из готовых материалов токсичные, в том числе канцерогенные вещества: формальдегид, фенол, стирол, эпоксиполимеры практически не выделяют ника-

ких вредных веществ и не имеют запаха в отверждённом состоянии, что зачастую определяет их использование.

Эпоксидные полимеры до настоящего времени остаются наиболее перспективными среди высокомолекулярных соединений. Это материалы с высоким комплексом физико-механических показателей, которые относятся к наиболее востребованным и перспективным среди других полимеров с точки зрения применения в производстве клеев, лаков, пластмасс, матриц пресс-форм, для заливки небольших трансформаторов или узлов аппаратуры, кабельные соединительные, концевые муфты и т. д. [2]. Эпоксидные смолы (ЭС) являются одними из наиболее широко применяемых синтетических смол, которые используются как в качестве электроизоляционных

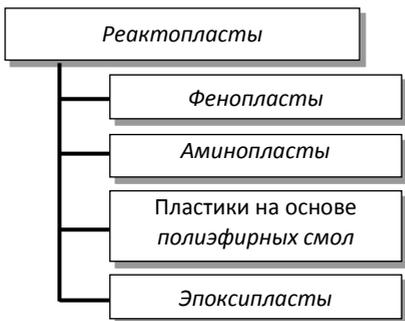


Рисунок 1 – Основные виды реактопластов

компаундов, лакокрасочных материалов и порошковых красок, так и в качестве связующих для КМ, применяемых для изготовления изделий различного функционального назначения. Эпоксидные полимеры, благодаря возможности их модификации, за счет наличия реакционноспособных гидроксильных и эпоксидных групп, с получением материалов с высокими показателями физико-механических свойств, по-прежнему являются наиболее перспективными среди других органических высокомолекулярных веществ (рисунок 2).

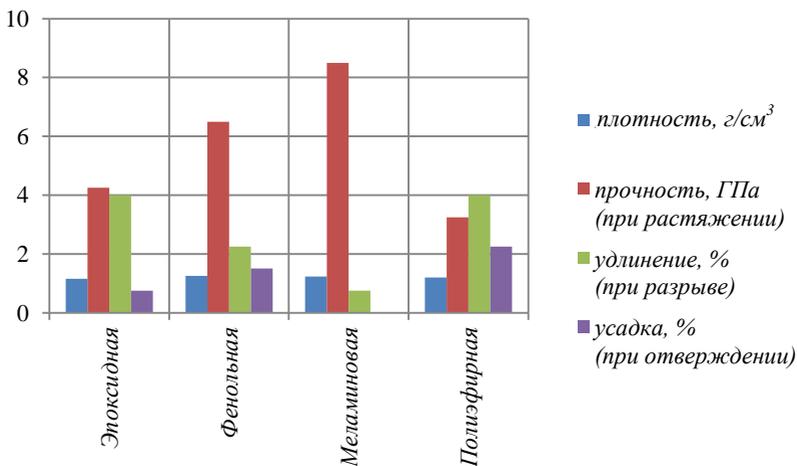


Рисунок 2 – Свойства термореактивных матриц

Исследования по изучению свойств ЭС и созданию КМ на их основе, направленные на изучение процессов их модификации и поисков новых способов отверждения, с целью получения новых конструкционных, изоляционных, герметизирующих и защитных материалов с уникальными свойствами ведутся уже достаточно давно, а разрабатываемые материалы получили широкое применение в различных отраслях [3].

ЭС совместимы с большим количеством полярных органических веществ и хорошо смачивают поверхности различных наполнителей. Это позволяет в значительной степени модифицировать КМ и регулировать их свойства. Общие практические задачи модификации эпоксидных полимеров направлены на улучшение технологических свойств связующих, повышение эксплуатационно-технических показателей и снижение экономических затрат. Долгое время традиционно используемыми модификаторами были нереакционноспособные материалы, такие как пластификаторы, растворители, каучуки. Наряду с улучшением эластичности КМ, их присутствие приводит к снижению прочности каркаса, по причине уменьшения связей, и росту усадки композита за время эксплуатации. Поэтому на их место приходят модификаторы, обладающие синергетическим эффектом, способные встраиваться в эпоксидную матрицу и улучшать свойства КМ в целом. Предпочтение отдается модифицирующим веществам, не образующим побочных продуктов реакции и не выделяющим летучих веществ в процессе эксплуатации материала на протяжении всего срока службы [4].

На практике многие вещества либо не совместимы, либо обладают ограниченной совместимостью. Это в значительной степени отражается на физико-механических характеристиках создаваемого КМ. Примером такого взаимодействия является эпоксидная смола и вода. Введенная в ЭС на любой стадии отверждения вода или водные растворы существенно ослабляет ее физические характеристики, делая изделия хрупкими, ввиду образования неоднородной структуры. Аналогичный результат можно получить при смешивании эпоксидной смолы с этиловым спиртом и растворами на его основе. Однако при определенных концентрациях спиртовой раствор ПВБ с отверждённой ПЭПА ЭД-20 можно достичь неожиданного эффекта. Получить однородный материал с хорошими эксплуатационными характеристиками, который возможно использовать либо в качестве изоляционного покрытия, либо конструкционного изоляционного материала.

В работе выполнены исследования свойств КМ, полученных на основе эпоксидной смолы, модифицированной спиртовым раствором ПВБ. Показано, что концентрационное содержание ПВБ и ПЭПА в составе КМ оказывает неоднозначное влияние на структуру создаваемого материала. Оптимизированный в рамках проведенных исследований состав обладает однородной бездефектной структурой и хорошими адгезионными свойствами. Помимо этого, зависимость удельного объемного электрического сопро-

тивления от концентрации отвердителя имеет экстремальный характер, при этом величина критического содержания отвердителя приблизительно лежит в диапазоне 13,5–14,5 %. Оптимизированный состав позволяет получить материал с хорошими эксплуатационными свойствами для использования в широком рабочем температурном диапазоне.

Список литературы

1 Михайлин, Ю. А. Термореактивные связующие ПКМ / Ю. А. Михайлин // Полимерные материалы. – 2009. – № 2. – С. 40–45.

2 Кислова, Ю. Российский рынок эпоксидных смол / Ю. Кислова // Композитный мир. – 2009. – № 6. – С. 20–21.

3 Еселев, А. Д. Эпоксидные смолы и отвердители для производства лакокрасочных материалов / А. Д. Еселев, В. А. Бобылев // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2005. – № 10. – С. 16–26

4 Влияние реакционноспособных модификаторов на свойства эпоксидных композиций / А. И. Загидуллин [и др.] // Вестник КГТУ. – 2003. – № 1. – С. 313–319.

УДК 539.374

ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЯТИСЛОЙНОЙ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ, ЗАЩЕМЛЕННОЙ ПО КОНТУРУ

Е. А. ЛАЧУГИНА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Слоистые элементы конструкции, в частности пластины, находят широкое применение в различных областях современной техники: космической, авиационной, кораблестроительной; промышленном, гражданском и транспортном строительстве, химическом и энергетическом машиностроении.

В монографиях [1–4] предлагаются общие подходы и различные кинематические гипотезы для слоистых конструкций при постановке краевых и начально-краевых задач. В работах [5–7] рассмотрены результаты исследования динамики слоистых оболочек. В источниках [8–12] содержатся исследования колебаний неоднородных балок и трехслойных упругих и вязкоупругих пластин.

В работе [14] содержится вывод уравнений движения круговой пятислойной симметричной по толщине пластины. Здесь рассмотрены собственные колебания подобной пластины, получены формулы для вычисления частот собственных колебаний и проведен их численный анализ в зависимости от толщины внутреннего несущего слоя.

Рассматривается симметричная по толщине пятислойная круговая пластина. Внешняя вертикальная распределенная нагрузка осесимметрична и не зависит от координаты φ : $q = q(r, t)$. На контуре пластины ($r = r_0$) предпо-

лагается наличие жесткой диафрагмы. Предполагалось, что контур пластины защемлен. Слои пластины выполнены из Д16Т – фторопласт-4 – Д16Т – фторопласт-4 – Д16Т. Толщины несущих слоев и заполнителей, отнесенные к радиусу пластины, следующие: $h_2 = h_4 = h_1 = 0,02$, $h_3 = h_5 = 0,2$.

Рисунок 1 иллюстрирует зависимость первых трех частот собственных колебаний ω_n от толщины внутреннего несущего слоя при неизменных толщинах остальных слоёв: 1 – ω_0 ; 2 – ω_1 ; 3 – ω_2 . При росте h_1 вначале наблюдается некоторое уменьшение частот, затем резкий рост, особенно у ω_1 , ω_2 .

На рисунке 2 приведены графики изменения частоты основного тона ω_0 в зависимости от толщины слоя h_1 при различных толщинах заполнителя (фторопласта-4): 1 – $h_3 = 0,1$; 2 – $h_3 = 0,2$; 3 – $h_3 = 0,3$. С увеличением толщины заполнителя растет жесткость пластины и наблюдается нелинейный рост частоты ω_0 .

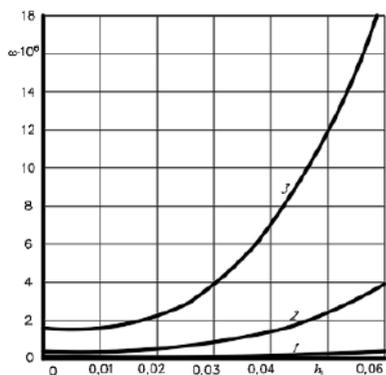


Рисунок 1 – Зависимость собственных частот ω_n от толщины внутреннего несущего слоя h_1

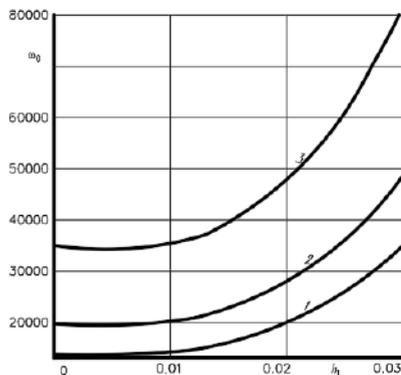


Рисунок 2 – Зависимость собственных частот ω_0 от толщины внутреннего несущего слоя h_1 при разных толщинах фторопласта

Список литературы

- 1 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.
- 2 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойных физически нелинейных стержней / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский. – М. : Изд-во МАИ, 2016. – 184 с.
- 3 Aghalovyan, L. Asymptotic theory of anisotropic plates and shells / L. Aghalovyan. – Singapore – London : World Scientific Publishing, 2015. – 376 p.
- 4 Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : Физматлит, 2005. – 576 с.

5 **Могилевич, Л. И.** Гидроупругость виброопоры с трехслойной круглой упругой пластиной с несжимаемым наполнителем / Л. И. Могилевич, В. С. Попов, Э. И. Старовойтов // Наука и техника транспорта. – 2006. – № 2. – С. 56–63.

6 **Tarлакoвskii, D. V.** Two-Dimensional Nonstationary Contact of Elastic Cylindrical or Spherical Shells / D. V. Tarлакoвskii, G.V. Fedotenkov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, no. 2. – P. 145–152.

7 **Старовойтов, Э. И.** Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.

8 **Fedotenkov, G. V.** Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam / G.V. Fedotenkov, D. V. Tarлакoвskii, Y. A. Vahterova // Lobachevskii journal of mathematics. – 2019. – Vol. 40, № 4. – P.439–447.

9 **Vakhneev, S.** Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation / S. Vakhneev, E. Starovoitov // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Vol. 18, no. 4. – P. 699–704.

10 **Pronina, P. F.** Study of the radiation situation in Moscow by investigating elastoplastic bodies in a neutron flux taking into account thermal effects / P. F. Pronina, O. V. Tushavina, E. I. Starovoitov // Periódico Tchê Química. – 2020. – Vol. 17, no 35. – Pp. 753–764.

11 **Леоненко, Д. В.** Собственные колебания трехслойного стержня на упругом основании / Д. В. Леоненко, Э. И. Старовойтов // Прикладная механика. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 37–46.

12 **Старовойтов, Э. И.** Колебания круговых трехслойных пластин под действием распределенных локальных нагрузок / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, А. В. Яровая // Проблемы прочности. – 2002. – Т. 34, № 5. – С. 70–79.

13 **Лачугина, Е. А.** Задача о свободных колебаниях пятислойной круговой пластины / Е. А. Лачугина // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч., Гомель, 24–25 ноябр. 2022 г. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – Ч. 2. – С. 202–204.

14 **Лачугина, Е. А.** Поперечные колебания пятислойной упругой круговой пластины с жесткими наполнителями / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2022. – Вып. 15. – С. 212–219.

УДК 539.374

ТЕРМОУПРУГИЙ ИЗГИБ КРУГОВОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ СТУПЕНЧАТО-ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Д. В. ЛЕОНЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Композитные элементы конструкций в виде слоистых стержней, пластин и оболочек широко используются в различных отраслях народного хозяйства [1–4]. Однослойные элементы переменной толщины рассмотрены в работах [5–7]. Здесь рассмотрен изгиб неупругой композитной круговой трехслойной пластины со ступенчато-переменной толщиной под действием термосилового нагружения.

Композитная пластина состоит из трех упругопластических слоев. Во внешних несущих слоях принимаются гипотезы Кирхгофа, во внутреннем слое – гипотеза Тимошенко. На границах слоев перемещения непрерывны. Толщины несущих слоев могут изменяться вдоль радиуса пластины ступенчато. На внешнюю поверхность первого несущего слоя действуют осесимметричные распределенные нагрузки $q_1(r)$, $q_2(r)$ и тепловой поток q_r . Упругие константы материалов слоев зависят от температуры.

На основании принципа Лагранжа выведена система дифференциальных уравнений равновесия. Получено ее аналитическое решение в перемещении при различных условиях закрепления внешнего контура. Проведен численный анализ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т22УЗБ-015).

Список литературы

1 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1 (22). – С. 31–35.

2 Деформирование ступенчатой композитной балки в температурном поле / Э. И. Старовойтов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 987–993.

3 Леоненко, Д. В. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Д. В. Леоненко, Э. И. Старовойтов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.

4 Леоненко, Д. В. Колебания круговых трехслойных пластин на упругом основании Пастернака / Д. В. Леоненко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2014. – № 1. – С. 59–63.

5 Коренева, Е. Б. Аналитические методы расчета пластин переменной толщины и их практические приложения / Е. Б. Коренева. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 240 с.

6 Долгополов, В. М. Изгиб круглой ортотропной пластинки переменной толщины / В. М. Долгополов // Некоторые задачи прикладной теории упругости : сб. науч. тр. – Саратов : Изд-во Саратовского политехнического ин-та, 1971. – С. 44–50.

7 Коваленко, А. Д. Круглые пластины переменной толщины / А. Д. Коваленко. – М. : Физматгиз. – 1959. – 294 с.

УДК 621.74.045

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Д. В. МАЛАШКОВ, А. С. НЕВЕРОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Потребности современного машиностроения в точных деталях сложной конфигурации определяют развитие прогрессивных методов и техноло-

гических процессов литья, направленных на получение качественных отливок. Одним из эффективных способов изготовления точных литых изделий является метод литья в гипсовые формы. Высокая чистота поверхности и точность размеров отливок позволяют применять лишь финишные операции для их обработки. При помощи данного метода изготовления отливок получают детали сложной конфигурации при толщине стенки, измеряемой долями миллиметра.

Литье металлов и сплавов в гипсовые формы известно давно. Русские мастера-литейщики широко использовали гипс, в частности при отливке Царь-пушки, Царь-колокола и др. Обычно для этого в качестве наполнителя применяли толченый кирпич. В XIX в. гипсовую форму применяли в России для отливки оловянных и свинцовых скульптур. Также использование гипса было распространено в зубопротезной и ювелирной промышленности. Позднее, благодаря созданию таких огнеупорных материалов, как шамот, диас, кристобалит и др., область



Рисунок 1 – Изделия из различных цветных сплавов на основе Sn, Zn, Al

использования гипсовых форм значительно расширилась, что позволило отливать промышленные, и в частности художественные, изделия практически любой сложности из различных цветных сплавов на основе Sn, Zn, Al, Cu, в том числе из драгоценных металлов. На рисунке 1 представлены изделия высокой сложности из цветных сплавов на основе Sn, Zn, Al.

Область применения литья в гипсовые формы весьма разнообразна.

Это изготовление отливок из цветных

сплавов различной конфигурации (корпусные детали, турбинные колеса со сложными лопатками и т. п.); зубопротезное производство (драгоценные сплавы); ювелирное и художественное литье. Особенности литья в гипсовые формы является хорошая текучесть формовочных смесей, высокая чистота рабочей поверхности формы после ее затвердевания и точность воспроизведения отпечатка, что делает возможным получение литейных форм по модели любой сложности. На рисунке 2 представлен патрубок впускной турбокомпрессора двигателя ЯМЗ-236.

Также важным свойством гипса является его более низкая, чем у всех применяемых в настоящее время формовочных материалов, теплопроводность. Малая теплопроводность позволяет медленно вводить металл в полость формы и создавать условия для направленного затвердевания отливки, благодаря этому в несколько раз уменьшается расход жидкого металла

по сравнению с литьем в землю и в кокиль [1]. Обработка гипсовых форм паром с повышенным давлением приводит к перекристаллизации гипса с образованием крупных округлых зерен, что снижает усадку формы после прокаливания и увеличивает ее газопроницаемость. Также следует уделять внимание пропорциям смешиваемых компонентов, которые должны быть просеяны и не должны содержать посторонних примесей. Среди огнеупорных наполнителей, вводимых в гипсовые смеси, наиболее распространены кварцевый песок, шамот, кристобалит, динас и др., использование которых придает разные свойства литейным формам [2].

Как видно из литературных данных, в настоящее время в гипсовых формах получают точные отливки массой от нескольких граммов до десятков килограммов, как правило, из цветных сплавов, в том числе драгоценных с температурой плавления до 1300 °С [3]. Составы гипсовых смесей зависят от требований, предъявляемых к отливке, ее массы, размеров и вида заливаемого сплава.

За последнее время опубликовано много работ, посвященных гипсовым смесям, направленных на улучшение качества литья, технологических свойств смесей и разработку специального оборудования. Разработаны теоретические основы процесса и новые гипсовые смеси с добавками талька, асбеста и других материалов, улучшающих свойства гипсовых форм и технологичность процесса их получения [3]. Также специальная обработка смесей позволяет создать в гипсовой форме множество мелких пузырьков воздуха, что значительно улучшает газопроницаемость форм без изменения гладкости их рабочей поверхности [4].

Тем не менее ряд недостатков, таких как длительность сушки гипсовых форм; повышенный расход огнеупорных материалов; преобладающее использование ручных операций при изготовлении отливок; ограниченное применение использованных формовочных материалов, предполагают проведение дополнительных исследований.

Использование отходов различных производств в качестве огнеупорного наполнителя гипсовых смесей позволит значительно сократить стоимость литейных форм и отливок, а следовательно, и повысить эффективность данного способа литья по сравнению с другими. Исследования гипсовой смеси, содержащей продукты сжигания древесного угля местной ТЭЦ в виде золы-уноса, показали принципиальную возможность использования золы в качестве огнеупорной добавки, что существенно снижает стоимость смеси и, следовательно, отливок. Также сокращение длительности технологического цикла изготовления литейных гипсовых форм и улучшение их свойств без



Рисунок 2 – Патрубок
впускной турбокомпрессора
двигателя ЯМЗ-236

использования трудоемких операций будет способствовать более широкому применению данного вида точного литья в промышленности.

Список литературы

1 **Иванов, В. Н.** Специальные виды литья : учеб. пособие / В. Н. Иванов; под ред. В. С. Шуляка. – М. : МГИУ, 2007. – 316 с.

2 Специальные способы литья : справ. / В. А. Ефимов [и др.]; под ред. В. А. Ефимова. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.

3 **Кестнер, О. Е.** Точное литье цветных сплавов в гипсовые и керамические формы / О. Е. Кестнер, В. К. Бураданьянц. – М. : Машиностроение, 1973. – 287 с.

4 Смесь наливная формовочная с повышенной газопроницаемостью для получения отливок из цветных сплавов : пат. RU2383410 / Дубрович В. К. – Опубл. 10.03.10.

УДК 539.3

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБ ИЗГИБЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ СО СЖИМАЕМЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ В ТЕРМОРАДИАЦИОННОМ ПОЛЕ

А. С. МЕЛЬНИКОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Область использования композитных конструкций в настоящее время достаточно широка. Они используются в машиностроении, авиастроении, приборостроении, строительстве и др. В работах [1–4] рассмотрены решения ряда задач статики и динамики композитных конструкций при комплексных силовых и температурных воздействиях.

Здесь рассмотрена постановка задачи об изгибе трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем в терморadiационном поле.

При радиационном (нейтронном) воздействии на упругопластическое тело в функцию пластичности и объемную деформацию вносятся корректировки. Физические уравнения пластичности в радиационном поле принимают вид

$$s_{ij} = 2Gf_1(\varepsilon_u, I)\varepsilon_{ij}, \quad \sigma = K \ 3\varepsilon - BI.$$

Здесь $I = \varphi t$ – интегральный нейтронный поток, который в пределах малых упругопластических деформаций приводит к увеличению радиационного упрочнения материала и росту предела текучести. Радиационное увеличение объемной деформации учитывается величиной BI , где B – константа материала.

При одновременном воздействии теплового и нейтронного потоков уравнения терморadiационной пластичности принимают вид

$$s_{ij} = 2G T f_1(\varepsilon_u, T, I) \varepsilon_{ij}, \quad \sigma = K 3\varepsilon - 3\alpha n T - B I$$

Далее применим данные физические уравнения к пластине, рассмотренной ранее в работе [5].

Предположим, что упругопластическая пластина находится в температурном поле $T_k z$ и облучается нейтронным потоком $I = \varphi t$, где φ – интенсивность в нейтрон/с, t – время. Соответствующие физические уравнения состояния примут вид

$$s_{ij}^{(k)} = 2G_k(T_k)(1 - \omega^k \varepsilon_u^k, T_k, I) \varepsilon_{ij}^{(k)},$$

$$\sigma^{(k)} = K_k(T_k)(3\varepsilon^k - 3\alpha_{0k} n T_k - B_k I) \quad i, j = x, y, z, k = 1, 2, 3,$$

где $s_{ij}^{(k)}$, $\sigma^{(k)}$ – девиаторная и шаровая часть тензора напряжений; $\varepsilon_{ij}^{(k)}$, ε^k – девиаторная и шаровая часть тензора деформаций; ε_u^k – интенсивность деформации в k -м слое; $\omega^k \varepsilon_u^k, T_k, I$ – функция пластичности Ильюшина в несущих слоях с учетом зависимости от величины нейтронного потока; $\omega^3 \varepsilon_u^3, T_k, I$ – универсальная функция, описывающая физическую нелинейность материала заполнителя с учетом зависимости от величины нейтронного потока; α_{0k} – коэффициент линейного температурного расширения; $G_k(T_k)$, $K_k(T_k)$ – температурно-зависимые модули упругости материалов слоев; nT_k – приращение температуры, отсчитываемое от некоторого начального значения T_0 .

Список литературы

- 1 Деформирование ступенчатой композитной балки в температурном поле / Э. И. Старовойтов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 987–993.
- 2 Леоненко, Д. В. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Д. В. Леоненко, Э. И. Старовойтов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.
- 3 Козел, А. Г. Термосиловой изгиб упругой трехслойной пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации : междунар. сб. науч. тр. – Гомель : БелГУТ, 2021. – Вып. 14. – С. 90–96.
- 4 Нестерович, А. В. Осесимметричное нагружение круглой физически нелинейной трехслойной пластины в своей плоскости / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 3 (48). – С. 24–29.
- 5 Зеленая, А. С. Изгиб термоупругопластической трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // Механика. Исследования и инновации : междунар. сб. науч. тр. – Гомель : БелГУТ, 2019. – Вып. 12. – С. 76–84.

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОЁМКОСТИ КРУГОВОЙ ТРЁХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ

М. В. МАРКОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Композитные слоистые элементы давно зарекомендовали себя в инженерном деле благодаря взаимодополняющему сочетанию в рамках единого пакета разнородных свойств совместно работающих материалов. Принцип работы трёхслойных пакетов основан на восприятии механических воздействий внешними прочными и жёсткими слоями. Срединный наполнитель, в свою очередь, обеспечивает взаимосвязь и перераспределение напряжений между внешними слоями и наделяет пакет дополнительными свойствами: тепло- и звукоизоляцией, электромагнитной и радиационной непроницаемостью и др.

В рамках исследования рассмотрено динамическое деформирование круговой трёхслойной пластины со ступенчатым изменением толщины внешних слоёв вдоль радиуса.

При построении механико-математической модели кинематика пакета описывалась в рамках гипотезы «ломаной линии», согласно которой деформирование тонких внешних слоёв происходит в соответствии с классическими гипотезами Кирхгофа [1], в относительно толстом срединном наполнителе учитывается возникновение сдвиговых деформаций по модели Тимошенко [2]. Также представленная механико-математическая модель предполагает выполнение условия непрерывности перемещений на границе сопряжения слоёв.

Основные уравнения движения пластины получены с помощью вариационного принципа Гамильтона [3, 4]. Начальные условия колебаний приняты однородными. Граничные условия формируются из требования ограниченности решений в центральной точке пластины; способа опирания внешнего контура; равенства линейных и угловых перемещений, а также внутренних усилий в точке изменения толщины пакета. Аналитическое решение рассматриваемой задачи основано на суперпозиции квазистатических и динамических составляющих перемещений, возникающих в пластине [5, 6].

Анализ конструктивного исполнения пластины выполнен на основе сравнения деформативности при восприятии внешней нагрузки. За основу принята величина прогиба, возникающего в первой амплитуде колебаний пластины, воспринимающей внезапно приложенное воздействие постоянной во времени интенсивности.

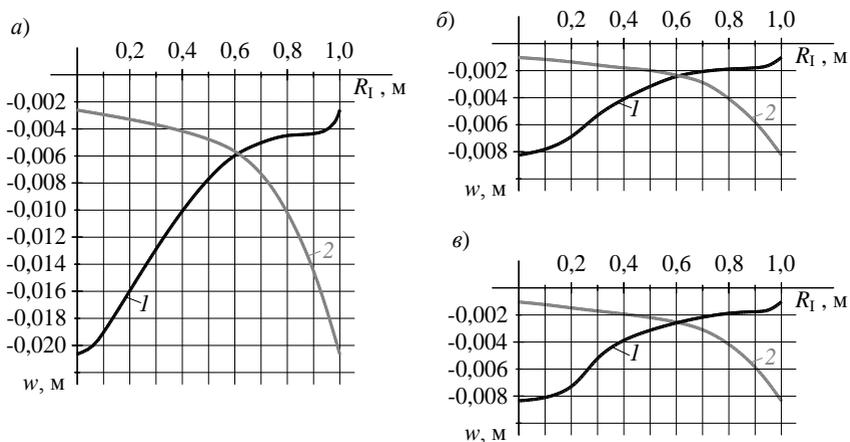
Рассмотренные пакеты пластин представлены материалами, имеющими следующие физико-механические характеристики [7–9]: дюралюминий

(Д16Т) – $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$; $K = 0,8 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $G = 0,267 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; фторопласт-4 – $\rho = 2150 \text{ кг/м}^3$; $K = 345 \cdot 10^6 \text{ Па}$, $G = 90 \cdot 10^6 \text{ Па}$; сталь – $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; $K = 1,913 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $G = 0,78 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; полистирольный пенопласт (ПС-1) – $\rho = 60 \text{ кг/м}^3$; $K = 10 \cdot 10^6 \text{ Па}$, $G = 15 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Здесь ρ – плотность материала; K – модуль объёмной деформации; G – модуль сдвига.

Внешний радиус анализируемых пластин равен 1 м. Толщина срединного слоя составляет 0,3 м. Толщина внешних слоёв на более тонких участках равна 0,02 м; на более толстых – 0,04 м. Рассматриваемые пластины имеют как уширение в центральной части, так и сужение.

Внешняя нагрузка равномерно распределена по всей площади пластины и имеет интенсивность 100 кПа. Контур пластины жёстко закреплён.

На рисунке 1 приведены графики изменения прогибов в центральной точке пластины в зависимости от изменения радиуса центрального участка.



1 – ступенчатая пластина с уширением в центральной части;

2 – ступенчатая пластина с сужением в центральной части

Рисунок 1 – График изменения величины прогиба в центральной точке пластины в момент первого максимального прогиба в процессе колебаний:

а – пакет «Д16Т – фторопласт-4 – Д16Т»; б – пакет «сталь – фторопласт-4 – сталь»;

в – пакет «сталь – ПС-1 – сталь»

Из приведённых графиков видно, что при радиусе центрального участка, составляющем 61,5 % от общего радиуса рассмотренных пластин, для всех пакетов пластина с сужением и пластина с уширением в центральной части имеет равный прогиб при восприятии одинаковой нагрузки. При этом материалоемкость внешних слоёв пластины с двукратным уширением по периферии на 18 % выше материалоемкости пластины с двукратным уширением в центральной части.

Из чего можно сделать вывод, что при конструировании жёстко защемлённой по внешнему контуру круговой трёхслойной пластины предпочтительнее стоит отдать конструктивным решениям, предполагающим утолщение несущих слоёв в центральной части пластины.

Работа выполнена в рамках БРФФИ (проект № T22M-072).

Список литературы

1 **Bauchau, O.** Kirchhoff plate theory / O. Bauchau, J. Craig // Structural analysis. – 2009. – №. 163. – P. 819–914.

2 **Timoshenko, S. P.** On the correction for shear the differential equation for transverse vibrations of the prismatic bars / S. P. Timoshenko // Philosophical magazine and journal of science. – 1921. – № 41 (245). – P. 744–746. – DOI: 10.1080/14786442108636264

3 **Новацкий, В.** Теория упругости / В. Новацкий. – М. : Мир, 1975. – 872 с.

4 **Маркова, М. В.** Постановка начально-краевой задачи об осесимметричных колебаниях круговой трёхслойной пластины переменной толщины / М. В. Маркова, Д. В. Леоненко // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. – Минск, 2022. – Вып. 36. – С. 3–10.

5 **Тонг, К. Н.** Теория механических колебаний / К. Н. Тонг. – М. : Машгиз, 1963. – 351 с.

6 **Маркова, М. В.** Вынужденные колебания круговой трёхслойной пластины ступенчато-переменной толщины / М. В. Маркова // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2022. – № 3 (132). – С. 121–127.

7 **Плескачевский, Ю. М.** Механика трёхслойных стержней и пластин, связанных с упругим основанием : [монография] / Ю. М. Плескачевский, Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко. – М. : Физматлит, 2011. – 560 с.

8 Строительные конструкции с применением пластмасс. Примеры проектирования и расчета : учеб. пособие для инж.-строит. вузов и фак. / А. М. Иванов [и др.]. – М. : Высш. шк., 1968. – 220 с.

9 СНиП II-23–81*. Стальные конструкции. – Введ. 01.01.1982. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.

УДК 67.017

ОСОБЕННОСТИ ПРОПИТКИ ПРИРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Л. МОИСЕЕНКО, К. В. МАКСИМЧИК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При исследовании пропитки древесных природных композиционных материалов учитывался опыт многих ученых, работающих в данном направлении [1–3].

В процессе пропитки древесины смазочными составами при высоких температурах происходит одновременно и удаление из образцов связанной влаги, обуславливающее их усушку.

Исследование усушки (образования зазора) древесины в процессе пропитки показали, что с увеличением температуры сокращается продолжительность образования зазоров, как и при сушке в печах. Так, величина макси-

мального зазора 1,2 мм при 140 °С достигается за 45–50 минут, при 130 °С – за 70–80 минут, при 110 °С – за 180 минут; при 90 °С за 180 минут зазор составил 0,1 мм. Количество впитанной смазки при повышении температур уменьшается: при температуре 90 °С за 60 минут впитывается 1,2 г, при 120 °С – 0,7 г, а при 140 °С – 0,5 г. Однако в действительности одновременно с пропиткой происходит и удаление связанной влаги, которое с повышением температуры увеличивается.

Установлено (таблица 1), что пропитка происходит наиболее быстро в течение 30 мин при температуре 90 °С, однако при этой температуре практически не наблюдается образование зазора вследствие минимального удаления связанной влаги. Поэтому при эксплуатации ПСС, вследствие генерируемого в контактной зоне тепла, будет происходить дальнейшее удаление связанной влаги и образование зазоров в стыке сторон согнутой карточки.

Таблица 1 – Зависимость реального количества впитанной смазки от температуры и продолжительности выдержки

Показатель	t, мин	Температура выдержки					
		140	130	120	110	100	90
$g_{см}, г$	30	0,81	0,82	0,74	0,88	0,97	1,02
	60	1,28	1,33	1,23	1,53	1,56	1,48
	90	1,55	1,58	1,57	1,84	1,82	1,72
	120	1,71	1,77	1,77	2,02	2,0	1,92

Это вызовет ослабление натяга в соединении втулки с корпусом подшипника, ее проворачивание, изменение зазора между втулкой и валом, а следовательно, может произойти выход из строя подшипника. Для придания стабильности размерам подшипника при эксплуатации необходимо предусмотреть удаление связанной влаги во время технологического процесса, а именно при совмещении одновременной пропитки и сушки. Как видно из графика, образование стабильного внутреннего зазора происходит при 140 °С в течение 40–60 минут, что свидетельствует о максимальном удалении связанной влаги. При этой же температуре впитывается и оптимальное количество модифицированной смазки, обеспечивающей нормальную работоспособность СПС. При охлаждении пропитанной заготовки модифицированная смазка загущается непосредственно в капиллярно-пористой системе древесины.

Усушка древесины во время пропитки при температуре до 100 °С происходит очень медленно, продолжительность образования максимального зазора увеличивается во много раз и практически не достигается.

Во время сушки в печи при 90 °С образование зазора достигается в течение 20 минут, и за 160–180 минут он достигает своих максимальных размеров.

При сушке в ванне при температуре 90 °С зазор между торцами втулок образуется очень медленно. Возможность его измерить появляется только через 140–180 минут, и в течение даже продолжительного времени он не достигает своих максимальных размеров.

Возможно, это связано с тем, что при пропитке в смазочном материале при температуре 90 °С недостаточно энергии для удаления из древесины связанной влаги, а при сушке в печи она свободно удаляется из открытой капиллярно-пористой системы древесины.

Зазоры в стыке карточки во время сушки в термошкафах и пропитки в ванне идентичны, что подтверждает полное удаление связанной влаги. Смазка заполняет только капиллярно-пористую систему древесины, и ее количество составляет около 5 %.

Толщина карточки вдоль волокон изменяется незначительно, и в среднем составила 0,05 мм при высоте 9 мм, что в процессе эксплуатации СПС не влияет на работоспособность подшипников скольжения.

Список литературы

1 **Ханмамедов, К. М.** Ускоренная сушка древесины в безводных жидкостях с одновременной её пропиткой / К. М. Ханмамедов. – Баку : Азнефтеиздат, 1960. – 178 с.

2 **Белый, В. А.** Модификация прессованной древесины полимерными смолами / В. А. Белый, В. Ф. Анненков, Н. А. Екименко // Пластификация и модификация древесины. – Рига : Зинатне, 1970. – С. 203–210.

3 **Врублевский, В. Б.** Перспективные конструкции и технологии изготовления подшипников скольжения / В. Б. Врублевский, А. Б. Невзорова // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин : темат. сб. – Новополоцк : Полоцкий госуд. ун-т, 1999. – С. 107–108.

УДК 67.019

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ПРЕССОВАНИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ПРИРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Л. МОИСЕЕНКО, К. В. МАКСИМЧИК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Исследования по определению усилий прессования проводили многие учёные [1], но они определяли усилия при равномерном по сечению распределении стелени прессования. Нами получены результаты усилий при неравномерном прессовании заготовок из природных композиционных материалов.

При проведении эксперимента по изучению влияния породы древесины на усилия прессования использовали заготовки из березы, клена, граба и сосны. Все заготовки были одинаковых геометрических размеров и влажностью 10 %. По результатам исследований определено, что наибольшее усилие возникает при ТПД клена и граба, которые по своему значению равны.

Значение максимальных усилий, возникающих при ТПД клена и граба, примерно в 1,2 раза выше, чем у березы, и в 2 раза выше, чем у сосны. Максимальные усилия возникают при достижении расчетной (50 %) степени прессования.

Исследование влияния геометрических размеров заготовок на усилие ТПД проводили на специально изготовленном устройстве, при этом изменялись три фактора (длина, высота, ширина).

Каждый из этих факторов менялся на двух уровнях: длина – 150, нижний уровень, 200 – верхний уровень; ширина – 25 и 50; высота – 12 и 24, соответственно верхний и нижний уровни.

Устройство представляет собой гибкий элемент, одним концом закрепленный на жесткой опоре. Ко второму концу крепится динамометр. Заготовка вставляется в гибкий элемент и изгибается во втулку, при этом фиксируются показания динамометра. По результатам испытаний построены графики регрессионных зависимостей усилий гнутья для геометрических размеров заготовки (рисунок 1). Из рисунка видно, что основное влияние на усилие гнутья оказывает высота и ширина заготовки. Изменение лишь длины карточки слабо влияет на усилие гнутья. Так, при $L = 200$ мм, $B = 50$ мм и $t = 24$ мм величина усилия равна для клёна 2128,5 Н, для берёзы 1875,5 мм и для сосны 1028,5 Н, а при изменении длины до $L = 150$ мм они, соответственно, увеличиваются или уменьшается не более чем на 3 %, что может являться погрешностью измерений. При изменении ширины карточки с 25 мм до $B = 50$ мм остальные размеры остаются прежними (см. рисунок 1), значения усилий уменьшаются примерно в 1,8 раза для клёна и берёзы и в 1,6 раза для сосны.

С изменением только высоты карточки значения усилий деформирования уменьшаются в 2, 2,9 и 5 раз соответственно для клёна, берёзы и сосны.

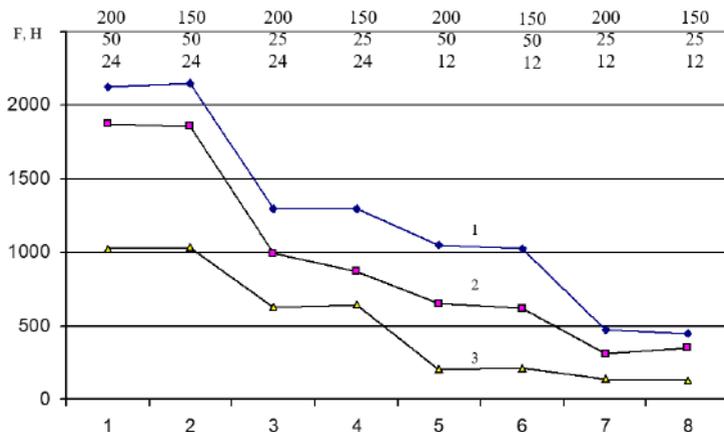


Рисунок 1 – Зависимость усилий ТПД от геометрических размеров заготовок:
1 – клен; 2 – береза; 3 – сосна

Список литературы

1 Невзорова, А. Б. Новый способ гнутья древесины для изготовления подшиповников скольжения / А. Б. Невзорова, В. И. Врублевская, В. Б. Врублевский // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2000. – Т. 5, № 3. – С. 79–82.

УДК 625.723

ПРИМЕНЕНИЕ ДРЕНИРУЮЩЕГО АСФАЛЬТОБЕТОНА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

М. С. МОРДАС

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Дренирующий асфальтобетон – это покрытие дорожного полотна, которое имеет верхний слой, обеспечивающий быстрый отвод воды с поверхности дороги во время выпадения осадков. На рисунке 1 показано, как вода проникает в поры дренирующего асфальтобетона и выходит из покрытия. При использовании этой технологии исключается появление пленки воды на поверхности покрытия, также технология не позволяет проникать воде в нижние слои основания, что исключает снижение прочности всей конструкции. Коэффициент сцепления данного покрытия выше 30 %, что является одним из важным критерием безопасного вождения [1].

Особым преимуществом являются сниженные деформационные характеристики и повышенная сдвигоустойчивость, а также снижение уровня шума при движении автомобильного транспорта. На таком покрытии в ночное время хорошо видна разметка.



Рисунок 1 – Дренирующий асфальтобетон

Широкое распространение дренарующий асфальтобетон получил на автобанах Германии, других странах Европы и США. В Японии и европейских странах данное покрытие используют при строительстве автомобильных дорог с целью повышения коэффициента сцепления при выпадении осадков. Во время движения автотранспорта по дренающему асфальтобетону со скоростью 100 км/ч коэффициент сцепления снижается на 20 %, а по плотному асфальтобетону – на 50 %.

Дренарующий асфальтобетон, согласно зарубежным источникам, рассчитан на эксплуатацию в покрытии автомобильной дороги в течение 15 лет [2].

Из отрицательных качеств данного покрытия можно отметить низкую прочность, что вызывает необходимость ограничивать движение по нему загрязненного и тяжелого автотранспорта.

Применение пескосоляных смесей для борьбы с гололедом в зимнее время недопустимо на дренающем асфальтобетоне, так как такие материалы забивают поры в данном покрытии и выводят его из строя. Альтернативой может служить использование чистых солей для борьбы с гололедом. Пористость дренающего асфальтобетона постепенно уменьшается и равна 50 % от первоначальной уже через 4 года после эксплуатации [3].

Применение дренающих асфальтобетонов в Республике Беларусь затруднено в связи с большим количеством температурных циклов, во время которых содержащие влагу грунтовые частицы увеличиваются и разрушают структуру асфальтобетона.

Однако применение покрытий с дренающим асфальтобетоном целесообразно на элементах обустройства городских улиц и внутридворовых территориях, где недопустимо движение тяжелых транспортных средств. Это позволит повысить безопасность движения пешеходов и водителей по внутридворовым территориям в осенне-зимний период.

Список литературы

1 Новый тип асфальта был уложен на экспериментальном участке трассы М-4 «Дон» в Краснодарском крае [Electronic resource] // Российские автомобильные дороги. – Режим доступа : <http://www.russianhighways.ru/press/news/10296/>. – Дата доступа : 27.03.2023.

2 Анализ положительных и отрицательных качеств дренающего асфальтобетона [Electronic resource]. – Режим доступа : <http://www.science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/Articles/0501002-.pdf>. – Дата доступа : 27.03.2023.

3 В России создают технологии «умного» асфальта [Electronic resource]. – Режим доступа : <http://www.sectormedia.ru/news/dorozhnoe-stroitelstvo/tehnologii-sozdaniya-umnogo-asfaltobetona/>. – Дата доступа : 27.03.2023.

ИЗУЧЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ ХЛОРИДА НАТРИЯ В КАЧЕСТВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ К ВЯЖУЩИМ ВЕЩЕСТВАМ

А. С. НЕВЕРОВ, Л. В. САМУСЕВА, Е. С. ФЁДОРОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Коррозия стали в бетоне является нежелательным явлением, поскольку ее развитие приводит к уменьшению площади сечения арматуры и вызывает (вследствие увеличения объема продуктов коррозии стали) появление трещин в бетоне, снижение жесткости и несущей способности конструкций, которые не могут быть учтены расчетом. Начавшийся процесс коррозии арматуры приостановить трудно. Стойкость железобетонных конструкций в условиях агрессивного воздействия предопределяется надежностью совместной работы арматуры с бетоном. Защитное действие бетона по отношению к арматуре определяется способностью цементного камня пассивировать поверхность арматуры, нарушение прочного контакта (сцепления) арматуры и бетона, даже частичное, может способствовать развитию ее электрохимической коррозии. Пассивация поверхностных слоев арматурных стержней происходит при определенном содержании гидрата окиси кальция в цементном камне и когда показатель pH в бетоне или растворе достигает 11,5, если доступ воздуха ограничен, или 11,8 – если свободен.

Положительным качеством хлорсодержащих добавок к бетонам (CaCl_2 , AlCl_3 , NaCl и т. д.) является способность оказывать ускоряющее действие во все сроки твердения всех видов цементов, а также увеличивать конечную прочность бетона. Применение хлорида натрия вызывает также повышение морозостойкости, что тоже является положительным свойством.

Отрицательное свойство этих добавок – выделение ионов хлора, вызывающих коррозию стальной арматуры. Этот недостаток может быть частично устранен при одновременном введении в бетоны ингибиторов коррозии стали типа нитрита натрия или нитрита кальция. К числу добавок, ускоряющих твердение, относится также поташ (K_2CO_3), щелочная реакция которого, повышая pH среды, может снижать вероятность коррозии арматуры.

С целью понизить коррозионную активность хлорсодержащих добавок при сохранении их полезных свойств была исследована возможность сочетания в комплексной добавке хлорсодержащих (NaCl), нейтральных (NaNO_3) и щелочных добавок (K_2CO_3 и Na_2CO_3).

С K_2CO_3 были получены неоднозначные результаты, в определённом интервале концентраций он коррозию ускорял, а не снижал. Наилучшие результаты были получены для комплексной добавки на основе NaCl , NaNO_3 и Na_2CO_3 .

Для изучения коррозионной активности хлорида натрия использовался метод симплекс-решетчатого планирования, применение которого позволит сократить количество проводимых экспериментов до 15. Данные представляются в виде треугольной диаграммы, каждая из сторон соответствует определенному элементу в комплексной добавке и разбита на его процентное содержание.

Как показано на рисунке 1, в растворе, содержащем 1 г/л комплексной добавки, при соотношении ее компонентов $\text{NaCl} : \text{NaNO}_3 : \text{Na}_2\text{CO}_3 = 2 : 1 : 1$ скорость коррозии углеродистой стали, оцененная ускоренным образом на приборе, равна скорости коррозии стали в растворе, содержащем такое же количество чистого нитрата натрия, также частичное снижение коррозии может быть связано с повышением рН за счёт введения соды.

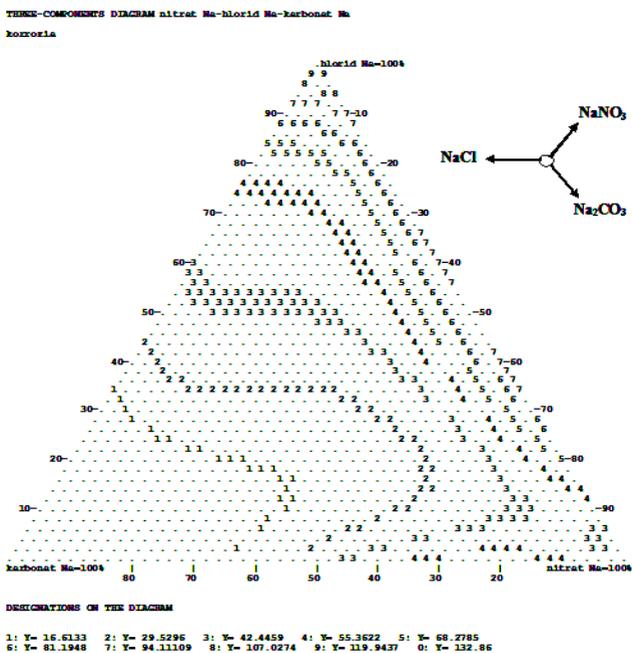


Рисунок 1 – Коррозия в растворе NaCl , NaNO_3 и Na_2CO_3 в зависимости от состава раствора. Кругом показана область оптимального в отношении коррозии стали состава

Рассмотрев все основные характеристики образцов и изучив влияние коррозии и водородного показателя при различных концентрациях элементов комплексной добавки, можно определить оптимальный состав, т. е. состав, при котором будут наблюдаться наиболее высокие механические

свойства, а также как можно меньшая коррозия. При этом необходимо учитывать также и водородный показатель (рисунок 2).

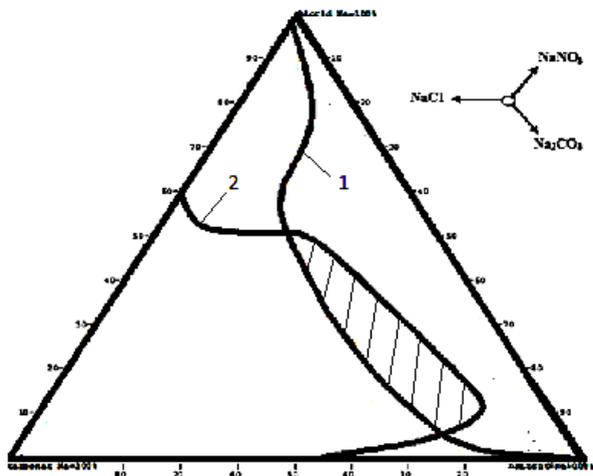


Рисунок 2 – Нахождение оптимального состава комплексной добавки к цементному раствору. Заштрихована оптимальная область

На данном рисунке указаны две изолинии, каждая из которых соответствует определенному параметру. Линия 1 – изолиния, отвечающая значению твердости 9,8 дел. (глубина погружения 0,098 мм, индентор игольчатого типа с углом 30° при вершине, нагрузка на индентор была равной 3 кг), соответствующей оптимальной твердости образцов на основе цементного раствора с добавкой 1 % NaNO_3 через 11 суток после их формирования. Линия 2 – изолиния, отвечающая скорости коррозии углеродистой стали 35–40 мкм/год (изолиния 3 на рисунке 1) в водном растворе NaNO_3 концентрации 1 г/л.

По итогам определения оптимального состава комплексной добавки для дальнейших исследований был выбран состав: NaNO_3 12 %, NaCl 24 %, Na_2CO_3 64 %.

Длительная выдержка цементных образцов с данной добавкой на воздухе и в среде паров серной кислоты показала, что комплексная добавка обеспечила твердость не менее высокую, чем с добавкой нитрата натрия и значительно большую, чем при использовании чистой хлорсодержащей добавки.

В парах серной кислоты были выдержаны два цементных образца со стальной арматурой. На рисунке 3 приведен внешний вид арматуры после испытаний: первая арматура образца с разработанной добавкой – № 2904-1 (слева) и вторая арматура образца без добавки – № 2904-2 (справа).



Рисунок 3 – Арматура после испытания, извлеченная из образцов № 2904-1 и № 2904-2. Увеличено: левый снимок в 48 раз, правый в 24 раза

Изучение поверхности стальных образцов позволяет сделать вывод о том, что применение разработанной комплексной добавки действительно снижает скорость коррозии арматуры.

Полученные предварительные результаты показывают, что возможно лучшие результаты тепловлажностной обработки могут быть получены при использовании водяных паров с пониженным рН. Это может быть предметом последующих исследований. Определены оптимальные составы комплексной добавки к бетонам на основе хлорсодержащих компонентов с пониженной коррозионной активностью. Это может иметь определённое значение для тех областей строительной индустрии и машиностроения, где используют армированные бетоны.

УДК 539.3

НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЕ НАГРУЖЕНИЕ КРУГЛОЙ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ПЛАСТИНЫ

А. В. НЕСТЕРОВИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Изучению напряженно-деформируемых состояний различных круговых пластин посвящено большое количество работ [1–4]. Рассматривается влияние неосесимметричного нагружения на круглую трехслойную физически нелинейную пластину в полярной системе координат. Непрерывно результирующая распределенная нагрузка приложена к срединной плоскости заполнителя. Ее проекции на оси координат: $p_r(r, \varphi)$, $p_\varphi(r, \varphi)$. Считается, что материалы несущих слоев упругопластические, заполнитель – нелинейно упругий. В перемещениях итерационная система дифференциальных уравнений равновесия принимает вид

$$L_2 u_r^m + \frac{a_3}{a_1 x^2} u_{r,\varphi\varphi}^m + \frac{a_2 + a_3}{a_1 x} u_{\varphi x}^m - \frac{a_1 + a_3}{a_1 x^2} u_{\varphi,\varphi}^m = \frac{r_0^2}{a_1} - p_r + p_{r\omega}^{m-1},$$

$$L_2 u_\varphi^m + \frac{a_2 + a_3}{a_3 x} u_{r,x\varphi}^m + \frac{a_1}{a_3 x^2} u_{\varphi,\varphi\varphi}^m + \frac{a_1 + a_3}{a_3 x^2} u_{r,\varphi}^m = \frac{r_0^2}{a_3} - p_\varphi + p_{\varphi\omega}^{m-1}, \quad (1)$$

где u_r^m , u_φ^m – искомые радиальное и тангенциальное перемещения соответственно на m -м шаге приближения; r_0 – радиус пластины; $x = r/r_0$ – безразмерная радиальная координата; $p_{r\omega}^{m-1}$, $p_{\varphi\omega}^{m-1}$ – физические нелинейные добавки, определяемые по результатам предыдущего приближения; a_1, a_2, a_3 – коэффициенты, определенные упругими характеристиками материалов; L_2 – дифференциальный оператор; обозначения в нижнем индексе после запятой показывают операцию дифференцирования по указанным координатам.

Искомые перемещения, внешние и дополнительные нагрузки раскладываются в тригонометрические ряды Фурье и подставляются в систему (1). Далее проводятся необходимые преобразования, в результате получается система из четырех обыкновенных линейных дифференциальных уравнений для определения искомых функций перемещений.

В случае воздействия косинусоидальной нагрузки $p_r, r, \varphi = p_{r1} \cos \varphi$, $p_{r1} = \text{const}$, $p_\varphi = 0$ на закрепленную по контуру пластину система уравнений (1) имеет решение:

$$u_r^m(x, \varphi) = \left[\frac{19a_1^2 - 14a_1 a_2 - a_2^2}{2} \frac{p_{r1} - p_{r1\omega}^{m-1}}{3a_1 - a_2} - \frac{13a_1^2 - 18a_1 a_2 + a_2^2}{2} \frac{-p_{\varphi1\omega}^{m-1}}{3a_1 - a_2} \times \right. \\ \left. \times 1 - x^2 - \frac{a_1 - 3a_2}{16a_1} \frac{p_{r1} - p_{r1\omega}^{m-1}}{a_1 - a_2} - p_{\varphi1\omega}^{m-1} x^2 \ln x \right] \frac{r_0^2}{a_1} \cos \varphi,$$

$$u_\varphi^m(x, \varphi) = \left[\frac{-19a_1^2 - 14a_1 a_2 - a_2^2}{2} \frac{p_{r1} - p_{r1\omega}^{m-1}}{3a_1 - a_2} + \frac{13a_1^2 - 18a_1 a_2 + a_2^2}{2} \frac{-p_{\varphi1\omega}^{m-1}}{3a_1 - a_2} \times \right. \\ \left. \times 1 - x^2 - \frac{5a_1 + a_2}{16a_1} \frac{p_{r1} - p_{r1\omega}^{m-1}}{a_1 - a_2} - p_{\varphi1\omega}^{m-1} x^2 \ln x \right] \frac{r_0^2}{a_1} \sin \varphi,$$

$$u_{r0}^m(x) \equiv 0, \quad u_{\varphi0}^m(x) \equiv 0, \quad (2)$$

где u_{r0}^m x , $u_{\varphi 0}^m$ x – перемещения, соответствующие осесимметричному нагружению и определяемые на m -м шаге приближения; p_{r10}^{m-1} , p_{r10}^{m-1} – составляющие дополнительных нагрузок.

Численная апробация решения (2) показывает, что необходимо учитывать влияние физической нелинейности материалов слоев, что приводит к значительному уточнению параметров напряженно-деформированного состояния рассматриваемой пластины при неосесимметричном нагружении в своей плоскости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т22М-072).

Список литературы

1 Старовойтов, Э. И. Неосесимметричное деформирование круговой трехслойной пластины в своей плоскости / Э. И. Старовойтов, А. В. Нестерович // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 1 (54). – С. 38–45.

2 Старовойтов, Э. И. Неосесимметричное нагружение упругопластической трехслойной пластины в своей плоскости / Э. И. Старовойтов, А. В. Нестерович // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2022. – № 2. – С. 57–69.

3 Козел, А. Г. Влияние материалов слоев на изгиб сэндвич-пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 36. – С. 21–26.

4 Маркова, М. В. Напряженно-деформированное состояние круговой трёхслойной ступенчатой пластины при вынужденных колебаниях / М. В. Маркова // Механика. Исследования и инновации : междунар. сб. науч. тр. – Гомель : БелГУТ, 2022. – Вып. 15. – С. 134–146.

УДК 621:678.073:678.046

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРЕВЕСНОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*К. В. ОВЧИННИКОВ, В. М. ШАПОВАЛОВ, М. А. КОВАЛЕНКО,
Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

*Р. С. НАПРЕЕВ
ОДО «Полидрев», г. Гомель*

В настоящее время все большее распространение получают древеснополимерные композиты (ДПК) на основе термопластичных полимеров. Наиболее распространенными термопластами для полимерной матрицы в

таких композитах выступают полиолефины – полиэтилен и полипропилен. В качестве древесных наполнителей используются древесная крошка, мука или спрессованные из них гранулы, опилки, древесное волокно, стружка, древесно-растительные отходы сельскохозяйственного производства, измельченные отходы производства целлюлозы, картона, бумаги и т. п. Нередко для повышения прочностных характеристик изделия используются смеси вышеперечисленных материалов. Так, например, сочетание дисперсного древесного и растительного волокнистого наполнителей обычно позволяет обеспечить повышенную прочность при ударе и растяжении, а также высокую деформируемость материала при формовке, что важно для получения тонкостенных объемных изделий. Для получения составов с заданными свойствами в композиции вводят различные модификаторы: адгезивы, противоударные модификаторы, температурные стабилизаторы, антиокислители, антимикробные средства, поверхностно-активные вещества, красители, огнезащитные средства, светостабилизаторы, вспенивающие агенты и т. д.

Помимо строительства, мебельного производства, широкое применение ДПК находит в машиностроении. Так, уверенным лидером потребления ДПК в Европе является автомобильная промышленность, принимая на себя более половины общих объемов потребления. Важным фактором коммерческого успеха конструкций из ДПК является их низкое водопоглощение, долговечность, высокие прочностные характеристики, легкость установки и механической обработки, низкие (по сравнению с деревом) требования к технологическому обслуживанию. Листовые изделия из ДПК также обладают важным технологическим свойством – при нагреве до определенной температуры они легко поддаются изгибу, позволяя создавать любые радиусные и гнутые формы. Так, на ОДО «Полидрев» (г. Гомель) налажено производство деталей потолка тракторов ОАО «МТЗ» (рисунок 1).



Рисунок 1 – Лист и деталь потолка из ДПК (кабина тракторов МТЗ)

Изготовление деталей осуществляется из древесно-наполненного полипропилена (ДНПП) методом термопрессования за один технологический цикл с одновременным дублированием обивочными материалами.

Можно отметить, что, несмотря на высокое процентное содержание отходов древесины в изделиях из ДПК, данная продукция обычно имеет высокую себестоимость. В первую очередь это связано с использованием главным образом первичных полимеров и дорогостоящих модификаторов. Многие модификаторы токсичны и отрицательно влияют на экологичность изделий. Физико-химическое модифицирование полимерной матрицы и предварительная обработка древесного наполнителя также увеличивают себестоимость конечной продукции (стоимость высокоэффективных аппретирующих веществ может составлять 60–80 % общей стоимости композиции) и значительно усложняет технологический процесс.

В ИММС НАН Беларуси разработаны составы высоконаполненных ДПК [1] (отходы деревообрабатывающего производства составляют в них более 50 мас.%), позволяющие без применения дорогостоящих модификаторов или трудоемких технологических операций улучшить эксплуатационные характеристики изделий (водопоглощение, горючесть) с сохранением удовлетворительных прочностных показателей, уменьшить энергетические затраты на производство композиций, снизить себестоимость и улучшить экологичность производства изделий из ДПК.

В качестве полимерного связующего в композициях использовали вторичные полипропилен (ПП) и полиэтилен низкого давления (ПЭНД), в качестве наполнителя – древесную муку (ДМ) М 400 (фракция 0,2–0,4 мм), а также термопластичные отходы ДПК (ОДПК) производства ОДО «Полдрев», представляющие собой куски листового материала из ПП с приклеенными в процессе формовки полиэфирными тканями, наполненного ДМ. Технологический процесс подготовки ОДПК включал операции отделения полиэфирной ткани от ДПК и измельчение с получением дробленного композита. В качестве технологических смазок при экструзии использовали полиэтиленовый воск, стеараты цинка и кальция. Проведенные в работе [2] исследования позволили установить оптимальные рецептурно-технологические параметры получения лабораторных образцов ДПК на основе различных термопластичных связующих.

На промышленном экструзионном оборудовании на базе разработанных составов получена опытная партия профильных изделий, из которых были изготовлены образцы для проведения лабораторных испытаний на физико-механические показатели (прочность на изгиб, ударная вязкость) и водопоглощение. Результаты испытаний приведены в таблице 1 и демонстрируют высокий уровень показателей разработанных композиций.

На базе разработанных составов ДПК возможно производство широкой номенклатуры конкурентоспособных изделий для изделий машиностроительной отрасли, например формованных деталей из листовых заготовок для автомобильной и автотракторной техники.

Таблица 1 – Физико-механические показатели изделий

Показатель	ТНПА	Значение
1 Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² , не менее	ГОСТ 4647–2015	5
2 Прочность при изгибе, МПа, не менее	ГОСТ 4648–2014	30
3 Водопоглощение, %, не более	ГОСТ 4650–2014	2

Список литературы

1 Древесно-полимерная композиция для изделий декоративно-строительного назначения и способ ее получения : заявка ВУ а20210310 / В. М. Шаповалов [и др.] – Опубл. 04.11.2021.

2 Влияние отходов листового древесно-полимерного композита на физико-механические свойства композиционных материалов на основе термопластов / В. М. Шаповалов [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2021. – Вып. 4. – С. 82–91.

УДК 539.4

ПОСТАНОВКА СТАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ О РАСЧЕТЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА АУСТЕНИТ/МАРТЕНСИТ МАРТЕНСИТНОЙ ПРОСЛОЙКИ В МЕХАНИЧЕСКИ НАГРУЖЕННОМ ПРИЗМАТИЧЕСКОМ ФЕРРОМАГНИТНОМ МОНОКРИСТАЛЛЕ СОСТАВА ГЕЙСЛЕРА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ, НАХОДЯЩЕМСЯ В ЖЕСТКОЙ ЗАДЕЛКЕ, В СЛУЧАЕ НЕПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА

В. О. ОСТРИКОВ

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,
Республика Беларусь*

О. М. ОСТРИКОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Развитие технических систем основывается на использовании новых физических принципов функционирования рабочих элементов. Материалы с памятью формы, восстанавливающие свои геометрические размеры под действием магнитного поля, открывают новые возможности для создания технических систем нового поколения, функционирующих благодаря уникальным физико-механическим свойствам ферромагнитных сплавов Гейслера с эффектом запоминания формы [1–4].

Целью данной работы стала постановка задачи о расчете сил, действующих в плоскостях границ раздела аустенит/мартенсит мартенситной прослойки в случае непараллельных границ раздела в механически нагруженном призматическом монокристалле состава Гейслера, обладающем свойством памяти формы и находящемся в жесткой заделке.

На рисунке 1 показан фрагмент монокристалла Fe_2MnGa с непараллельными границами раздела аустенит/мартенсит (фотография любезно

предоставлена А. Л. Созиновым). При соприкосновении границ раздела, как это показано на рисунке 1, они теряют свою подвижность в направлении навстречу друг другу.



Рисунок 1 – Фрагмент монокристалла Fe_2MnGa с непараллельными соприкасающимися границами раздела аустенит/мартенсит (авторы благодарят А. Л. Созину за любезно предоставленную фотографию)

На рисунке 2 в соответствии с рисунком 1 схематически показаны силы и моменты сил, действующие на ферромагнитный призматический монокристалл с эффектом запоминания формы, с непараллельными межфазными границами в случае их соприкосновения, а на рисунке 3 – в случае удаленных друг от друга границ.

Заданными параметрами модели можно считать: приложенную к торцу образца нагрузку \vec{F} , угол θ , l_m , l_{a1} , l_{a2} (см. рисунки 1 и 2). Особый интерес представляет нахождение сил F_{ex1} и F_{ex2} , действующих в плоскостях межфазных границ, так как от величины этих сил зависит вовлеченность границ в процесс плоско-параллельного перемещения и связанный с ним эффект памяти формы.

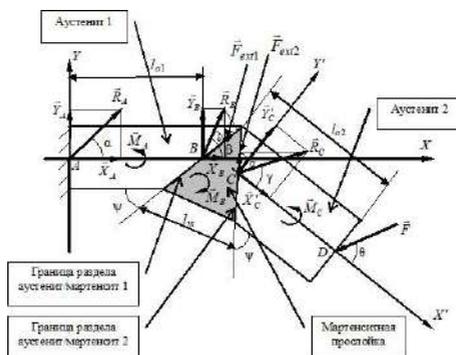


Рисунок 2 – Схематическое изображение находящегося в жесткой заделке механически нагруженного призматического монокристаллического образца с мартенситной прослойкой в случае соприкасающихся непараллельных межфазных границ

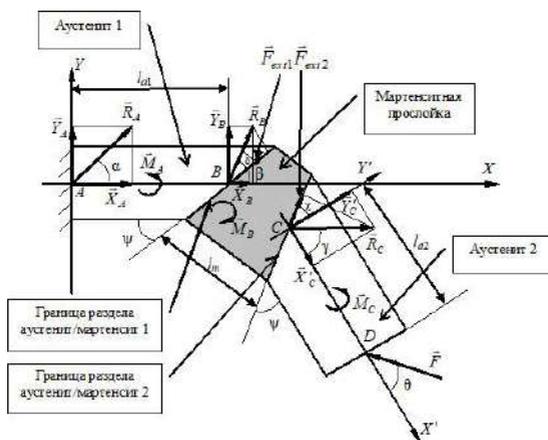


Рисунок 3 – Схематическое изображение находящегося в жесткой заделке механически нагруженного призматического монокристаллического образца с мартенситной прослойкой в случае несоприкасающихся непараллельных межфазных границ

Таким образом, выполнена постановка задачи о расчете сил, действующих на границах раздела аустенит/мартенсит мартенситной прослойки, в случае механически нагруженного находящегося в жесткой заделке призматического ферромагнитного монокристалла с эффектом памяти формы при непараллельных межфазных границах. Адекватность разработанной расчетной схемы и достоверность полученных на ее основе результатов базируется на применении классических методов расчетов, представленных в известной учебной литературе [5].

Список литературы

- 1 6 % magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni-Mn-Ga / S. J. Murrey [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2000. – V. 77. – P. 886–888.
- 2 Saren, A. Dynamic twinning stress and viscous-like damping of twin boundary motion in magnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga / A. Saren, K. Ullakko // Scripta Materialia. – 2017. – V. 139. – P. 126–129.
- 3 Остриков, В. О. Статика и динамика границы раздела аустенит/мартенсит в нагруженном призматическом монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в жесткой заделке / В. О. Остриков, О. М. Остриков // Машиностроение : респ. межведом. сб. науч. тр. / Белорусский национальный технический университет ; гл. ред. В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2021. – Вып. 33. – С. 139–147.
- 4 Остриков, О. М. Исследование пластической деформации поверхности монокристалла Ni_2MnGa методом индентирования / О. М. Остриков, А. Л. Созинов, А. В. Сорока // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85, № 5. – С. 1132–1141.
- 5 Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – М. : Высш. шк. – 2010. – 416 с.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СФЕРЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (ОБЗОР)

А. Г. ОТОКА

Гомельское вагонное депо

РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги»

В статье показано применение на железной дороге различных композиционных материалов, используемых при изготовлении средств неразрушающего контроля, а также непосредственно при проведении самого контроля в качестве вспомогательной оснастки или иного назначения.

Композиционные материалы – самый интенсивно развивающийся сегмент на рынке материалов. Повышенная прочность, пластичность, термостойкость, малая плотность – эти преимущества позволяют композитам все больше вытеснять классические материалы: дерево, металлы, камень. Все чаще композиты входят в привычный мир каждого человека, их применение в автомобилестроении, авиастроении и других отраслях экономики с каждым годом увеличивается [1].

Одним из основных факторов, обуславливающих выбор композитов в качестве конструкционных материалов в машиностроении, является большая усталостная долговечность по сравнению с традиционными материалами [2].

Хотелось бы отметить использование композитных материалов в неразрушающем контроле на железной дороге, которые получили широкое применение.

Одним из таких материалов является полиуретан, используемый в качестве фрикционного приводного ролика механизма вращения колесной пары (далее – КП) на различных стендах (рисунок 1).



Рисунок 1 – Приводные ролики стенда УДП-2001 и СУДКП (СДВК):
а – фрикционный ролик вращения КП с внутренней стороны обода колеса на вибродиагностическом стенде УДП-2001; *б* – фрикционный ролик вращения КП с внешней стороны обода колеса на стенде ультразвуковой дефектоскопии колесных пар СУДКП (СДВК); *в* – новые фрикционные ролики из резины и полиуретана для стендов СУДКП и УДП-2001

Еще сравнительно недавно применялась резина в качестве основного материала фрикционного ролика. Если сравнивать по износостойкости материалов на примере стенда УДП-2001, то через 5–7 месяцев резина сильно изнашивалась при объеме ремонта 3000 КП в год. В то время как полиуретановые ролики работали с боковой поверхностью колеса на протяжении 50–70 месяцев, что в 10 раз выше по показателю износостойкости и долговечности.

Полиуретан как эластомер отлично сохраняет геометрию и способен возвращаться к первоначальному состоянию при большом количестве циклов нагрузки, не поддается абразивам, не притягивает так сильно грязь, как резина. Известно, что коэффициент сцепления полиуретана более низкий в сравнении с резиной. Однако практика показывает, что полиуретан, используемый в качестве механизма сцепления с различными поверхностями железнодорожного колеса, удовлетворяет всем требованиям. Например, скорость вращения КП на вибродиагностическом стенде УДП-2001 с использованием полиуретановых роликов уверенно достигает 320–360 оборотов в минуту в зависимости от толщины обода при требовании нормативных документов не ниже 300 оборотов.

В качестве протекторов пьезоэлектрических преобразователей (далее – ПЭП) долгое время применяются такие композитные материалы, как керамика, органическое стекло. На сегодняшний день материал протектора может быть из эластичных пластмасс, нейлона, полиуретана, резины, металлизированного сплава. Материал протектора напрямую связан с предъявляемыми требованиями нормативных документов к проведению контроля.

Широкое распространение получили протекторы из полимерных пленок (полиуретана). Отличие в том, что влияние шероховатости контактной поверхности объекта контроля на чувствительность контактного ультразвукового контроля с использованием ПЭП с полиуретановым протектором меньше, чем при использовании керамики и оргстекла (рисунок 2). Все это говорит о хорошем контакте полиуретана с грубой и шероховатой поверхностью и высоким соотношением сигнал/шум [3].

Также к достоинствам можно отнести износ по стали полиуретана в результате сканирования поверхности контролируемой детали, который превосходит оргстекло как минимум в 4 раза.



Рисунок 2 – Пьезоэлектрические преобразователи с протекторами из различных материалов для ультразвуковых дефектоскопов:

а – протектор из керамики; *б* – протектор из оргстекла; *в* – протектор из полиуретана

Ввиду частого разрушения заводских керамических протекторов вихре-токовых преобразователей (далее – ВТП), а также их высокой стоимости на железнодорожных предприятиях прибегают к изготовлению собственными силами протекторов из легкодоступных материалов из фторопласта, текстолита, капролона (рисунок 3). На практике эти материалы доказали, что по чувствительности контроля стальных деталей не уступают керамике.

Изготовление протекторов из легкодоступных материалов силами самих предприятий позволяет сократить затраты на приобретение заводских протекторов в $\approx 50 \dots 100$ раз [4].

При контроле железнодорожных деталей магнитопорошковым методом композиты играют немаловажную роль. В качестве материала опорных валов для вращения колец подшипников на стационарных магнитных установках, различных подставок и технологических оснасток под определенные габаритные размеры объектов контроля в целях центрирования по отношению к намагничивающим устройствам, рукояток соленоидов и др. используется в основном текстолит и пластмасса.

Для изготовления электроизоляционных деталей, панелей, корпусов приборов используются полиамиды, фторопласты, полипропилен, полистирол, полиакрилаты, эпоксипласты, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, волокниты, текстолит, стеклопластики и др.

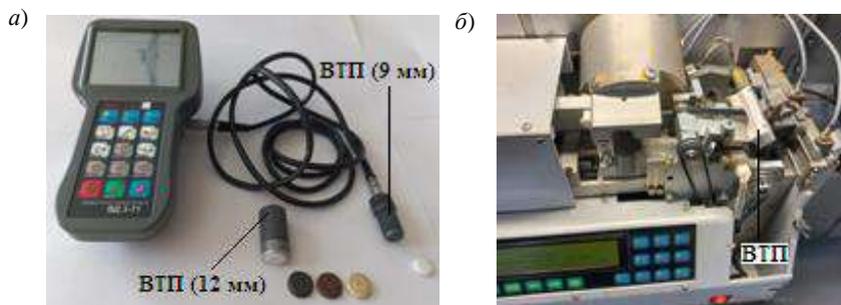


Рисунок 3 – Применяемые материалы в качестве протектора и корпуса ВТП:
а – протекторы из фторопласта, керамики, текстолита, капролона в составе ВТП ПН-12-МДФ01, ПН-09-МДФ-У-01 (дефектоскоп вихретоковый ВДЗ-71); б – корпус осевого ВТП из полимерного материала (дефектоскоп автоматизированный ВД-131НД)

В качестве материала намагничивающих устройств типа «соленоид» используют ударопрочную пластмассу и электроизоляционные компаунды, которые представляют собой смеси полимеров: смол, битумов, эфиров целлюлозы, иногда с добавлением минеральных наполнителей (кварцевой или слюдяной муки, стекловолокна) для повышения прочности и нагревостойкости.

Кроме смолы и отвердителя в состав компаундов входят пластификатор, наполнители и др. Компаунды защищают элементы аппаратуры от атмосферной влаги, повышают электрическую и механическую прочность (рисунок 4).

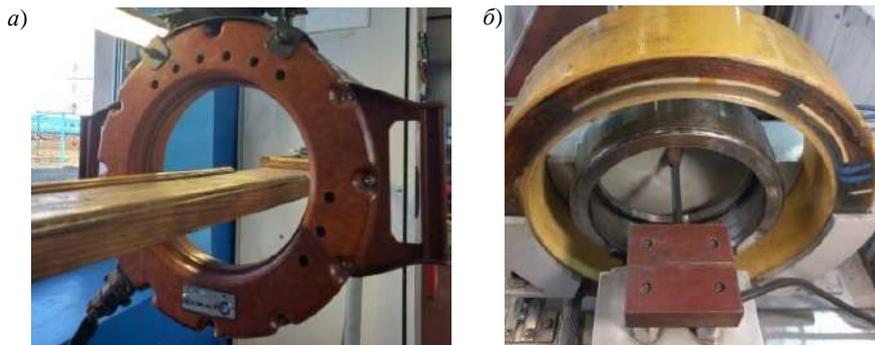


Рисунок 4 – Изготовление корпуса соленоида из различных композитов:
а – корпус соленоида из ударопрочного пластика (дефектоскоп магнитопорошковый МД-12ПШ); *б* – корпус соленоида из электроизоляционного компаунда (магнитная установка УМДП-01)

Таким образом, можно сделать вывод, что технология неразрушающего контроля сегодня просто не может обойтись без композиционных материалов. Такое развитие связано с высокими предъявляемыми требованиями к оборудованию неразрушающего контроля наряду с существующими композитами, а также появлением новых технологий, в т. ч. автоматизированных, где от материалов требуются определенные характеристики.

Список литературы

- 1 **Тимошков, П. Н.** Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) / П. Н. Тимошков, А. В. Хрульков, Л. Н. Язвенко // Труды ВИАМ. – № 6 (54). – 2017. – С. 61–68.
- 2 Применение композиционных материалов на транспорте / Ю. С. Кустарев [и др.] // Вестник ВГАВТ. – 2006. – Вып. 20. – С. 166–172.
- 3 **Дымкин, Г. Я.** Еще раз о влиянии шероховатости поверхности изделия на результаты УЗК прямым ПЭП / Г. Я. Дымкин, В. П. Лохов // В мире НК. – № 1 (35). – 2007. – С. 25–26.
- 4 **Отока, А. Г.** Применение различных материалов в качестве протектора для вихретоковых преобразователей / А. Г. Отока, О. В. Холодиллов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-та. – Могилев : БРУ, 2022. – С. 168–176.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д. Л. ПОДОБЕД

*Филиал «Институт профессионального образования»
Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Гомель*

Одним из путей улучшения эксплуатационных свойств композитов является целевое физическое модифицирование компонентов в полимерных смесях на основе вторичных полиолефинов, направленное на улучшение их прочности и пожаробезопасности. В особенности это актуально для изделий электротехнического назначения. В то же время для композитов с использованием вторичных термопластов исследований в этом плане недостаточно. Поэтому целью работы явилась оценка физико-механических свойств и показателей пожароопасности композитов на основе смесей вторичных термопластов и полидисперсного бентонита.

В качестве наполнителей использовали частицы исходной бентонитовой глины и предварительно модифицированные кремнийорганической жидкостью ПМС-200 и гудроном soapстока с последующим ее измельчением в планетарной мельнице «Pulverisette 5/4 classic line» («Fritsch», Германия) с достижением дисперсности частиц модифицированного бентонита 25–200 мкм. Наполнители вводили в количестве 1,0–6,0 мас.% от массы полимера. Вторичные полимеры (ПЭВД_{вт}, ПЭНД_{вт}, и ПП_{вт}) подвергали предварительному измельчению до частиц с размером 1–12 мм и мойке в течение 15 минут. В качестве целевой добавки использовали стеарат кальция или цинка в количестве 0,1–0,5 мас.%. Механическую прочность образцов определяли на испытательной машине «Instron 5567» («Instron», Великобритания) (ГОСТ 11262–2017). Физико-химические и структурные исследования проводили на ИК-спектрометре с Фурье-преобразованием «NEXUS E.S.P.» (Thermo Nicolet, США), рентгеновского дифрактометра «GNR APD 2000 PRO» (G.N.R. S.r.l., Италия) и с помощью сканирующего электронного микроскопа «VEGA II LSH» («TESCAN», Чехия).

Показано, что одной из важнейших задач при получении композитов с использованием полимерных отходов является их подготовка, включающая процессы их измельчения и мойки. Так, при измельчении ПП и ПЭ наиболее оптимальной фракцией, при которой достигается более высокая технологичность и прочностные свойства, является фракция в пределах 1–3 мм. Важной технологической операцией при рециклинге полимеров

является процесс их мойки. Установлено, что наиболее эффективным моечным раствором для вторичных ПЭ и ПП является подогретая до 70 °С вода.

Показана перспективность использования в смесях вторичных полиолефинов модифицированных полидисперсных бентонитовых глин. Анализ данных свидетельствует, что введение в смесь вторичных полиолефинов частиц модифицированной полидисперсной бентонитовой глины в количестве 2,5 мас. % способствует повышению прочности композитов в 1,5–2,0 раза по сравнению с композитом без наполнителя.

При этом установлено, что существенный вклад в повышение показателя прочности композита полидисперсным наполнителем оказывает фракция наполнителя в нем (таблица 1). Так, разрушающее напряжение при растяжении композитов с частицами размером 25 и 40 мкм и менее в концентрации 2,5 мас. % составляет 37,2 и 35,8 МПа, в то время как для композитов с частицами 100 мкм и 150–200 мкм 28,6 и 26,7 МПа соответственно. Таким образом, разный фракционный состав частиц в полидисперсном наполнителе реализует эффект гибридности частиц наполнителя в композиционной системе, обеспечивающий образование упорядоченной структуры. В то же время при увеличении содержания частиц бентонита в композите более 4 мас. % наблюдается тенденция к повышению крутящего момента в экструдере.

Таблица 1 – Механические и технологические свойства исследуемых композитов от дисперсности модифицированного бентонита

Свойства материала (2,5 мас.% мод. бентонита + смесь вторичных ПЭНД/ПЭВД)	Дисперсность бентонита, мкм					
	Полидисперсный наполнитель	25	40	100	200	300
Прочность при растяжении, МПа	34,6	34,8	37,2	28,6	26,7	21,5
Крутящий момент, Н·м	12,0	13,1	12,4	12,2	11,3	10,7

Инициирование физико-химического взаимодействия макромолекул вторичных ПО в смеси в присутствии модифицированного бентонита обеспечивается интенсификацией окислительных реакций и активирующим эффектом сдвига под давлением (эффект Ениколопова). Физико-химическая активность на границе раздела фаз способствует усилению адгезионного взаимодействия полимера и наполнителя.

Анализ дифрактограммы (рисунок 1) с сопоставлением расчетов размера кристаллитов позволил установить, что аморфных гало на дифрактограммах не наблюдается, что говорит о высокой степени кристалличности исследованных образцов.

Показано также, что применение в комплексе бентонитовой глины и антипиреновых добавок способствует снижению показателей пожарной опасности.

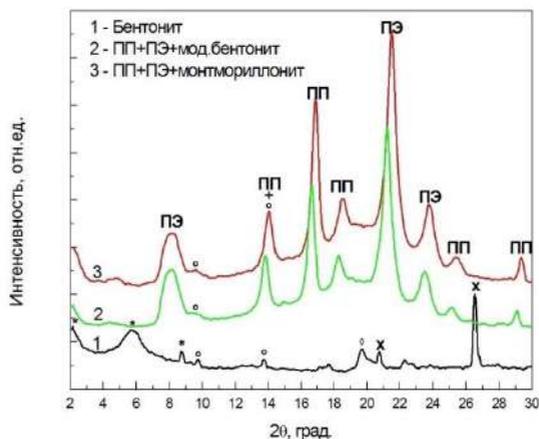


Рисунок 1 – Дифрактограмма смеси вторичных ПП и ПЭ с ультрадисперсными наполнителями – бентонитом и монтмориллонитом

Графическая интерпретация модели, представленная на рисунке 2, наглядно отображает влияние состава на механические характеристики композита. Установлено оптимальное содержание компонентов в композициях на основе смесей вторичных полимеров, при которых обеспечиваются максимальные показатели прочности: ПЭВД + ПЭНД + модифицированный бентонит – 60–40:40–60:2,0–4,0; ПП + ПЭВД + модифицированный бентонит – 40–60:60–40:2,5–4,0.

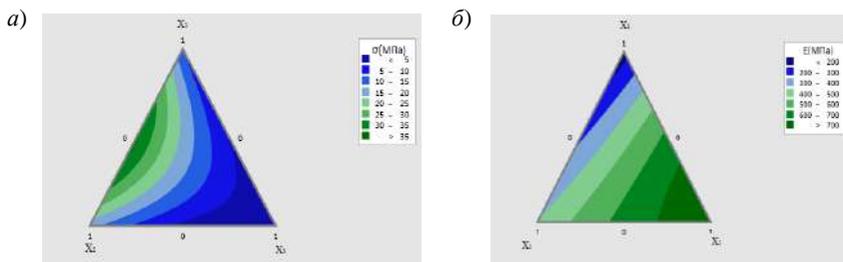


Рисунок 2 – Моделирование механических характеристик композиционной системы на основе ПЭВД_{вт.} + ПЭНД_{вт.} и мод. Бентонита:

a – разрушающее напряжение при растяжении; b – модуль упругости
 X_1, X_2, X_3 – доли компонентов в составе композита согласно статистическим данным

На основе разработанного композита на КУП «Светотехника» изготовлены детали электротехнической оснастки (блок зажимов БЗ10-4.0), которые внедрены на ООО «СКБ Защита-плюс» при устройстве элементов освещения.

Установлено, что решающим фактором для активирования межмолекулярных взаимодействий на границе раздела «полимер – наполнитель» представляется введение в композит частиц модифицированного полидисперсного бентонита с преобладающим содержанием частиц размером 40 мкм и менее. Такое положение позволяет реализовать эффект гибридности полидисперсного наполнителя и интенсифицировать в смесях вторичных полимеров процессы структурирования микрообъемов связующего вблизи частиц активированного ультрадисперсного наполнителя, оказывающие влияние на межмолекулярное взаимодействие в композиционной системе и процессы кристаллизации с формированием структурной однородности материала, что способствует улучшению прочности и пожаробезопасности композита в изделиях электротехнического назначения.

УДК 621:981.2

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ АЛЮМОНИТРИДА ТИТАНА ИЗ СОСТАВНОГО КАТОДА

А. Н. ПОПОВ, И. Л. ДМИТЕРКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Повышение работоспособности режущего инструмента, интенсификация режимов резания являются важнейшими резервами повышения эффективности механической обработки. Из большого многообразия методов повышения работоспособности режущих инструментов следует выделить вакуумные методы нанесения износостойких покрытий. Нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент позволяет существенно повысить его работоспособность и интенсифицировать режимы обработки [1]. В таблице 1 приведены основные характеристики наиболее часто применяемых покрытий.

Таблица 1 – Характеристики покрытий

Покрытие	TiN	TiCN	TiAlN	TiAlCrYN
Твердость, HV	2000–2500	2800–3100	2900–3400	2800–3200
Толщина, мкм	1–6	1–5	1–5	1–5
Внутренние напряжения, ГПа/мкм	1–2	1–2	1–2	1–2
Коэффициент трения по стали без смазки	0,4–0,6	0,3–0,4	0,3–0,4	0,3–0,4
Максимальная рабочая температура	500	400	800	400
Стойкость к изнашиванию:				
– абразивному	+	++	+++	++
– адгезионному	++	+	+++	+++

Из приведенных данных видно, что покрытия, состоящие из нескольких металлов, показывают лучшие результаты. На дуговых установках можно наносить композитные (состоящие из нескольких металлов) и многослойные покрытия. Для этого применяются различные мишени на разных стенках из чистых металлов (например, титана и алюминия), а можно использовать одну мишень из их сплава.

Целью данной работы является разработка конструкции составного катода и исследование покрытия алюмонитрида титана, полученного с его использованием [2].

Для получения покрытий была использована серийная установка вакуумного напыления УВНИПА-1-001. Эта установка оборудована газовым ионным источником ИИ-4-015, источником плазмы стационарного катодно-дугового разряда с металлическим катодом, источником плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита.

Были изготовлены составные катоды двух типов. В первом случае в титановом катоде было сделано углубление глубиной 5 мм и в диаметре 20 мм. Далее производилась заливка расплавленного Al. Отношение площади алюминия к титану 0,19. Во втором случае в катодах были просверлены отверстия диаметром 6 мм и глубиной 6 мм, куда забивался алюминий. Отношения площади алюминия к титану на поверхностях катодов составляло 0,045; 0,095 и 0,15.

При использовании катода первого типа процентная доля содержания Al в покрытии составила около 6 %. Капельная фаза значительно ниже, чем у TiN. Причина заключается в режиме нанесения покрытия – TiAlN наносился импульсами (нестабильное горение дуги), благодаря чему катод успевал значительно остыть и в зоне горения катодного пятна температура снижалась, что увеличивало степень ионизации потока и снижение содержания и размеров жидких капель [4].

Снимки с электронного микроскопа показывают, что при увеличении содержания алюминия в составных катодах снижается размер капельной фазы и ее содержание на подложке. Также по снимкам видно влияние капельной фазы на качество осаждаемого покрытия (рисунок 1). На поверхностях, находящихся около капель, видно отслоение и разрушение покрытия, это связано с

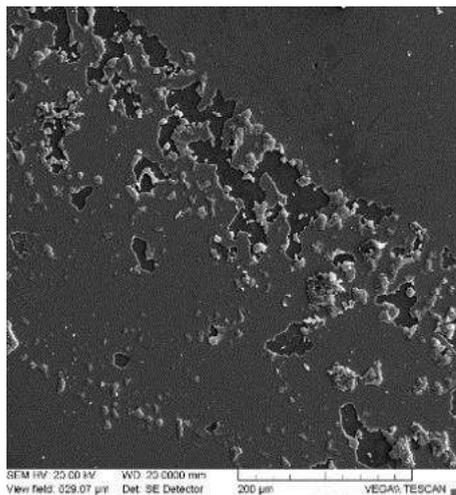


Рисунок 1 – Поверхность покрытия – TiAlN

тем, что в каплях возникают повышенные сжимающие напряжения. По полученным данным видно, что с повышением процентного содержания алюминия в составных катодах Ti+Al увеличивается соотношение титана к алюминию в получаемых покрытиях.

Было проведено исследование на нанотвердомере (таблица 2). Видно, что с увеличением содержания алюминия в покрытии твердость возрастает. Следует отметить, что полученные результаты занижены, т. к. покрытия тонкие и сказывалось влияние подложки.

Таблица 2 – Твердость и модуль упругости

Образец	Твердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа
TiN	13,86	207,00
TiAlN(Al/Ti = 0,109)	27,34	240, 83
TiAlN(Al/Ti = 0,197)	20, 64	304,62
TiAlN(Al/Ti = 0,2)	18,18	270, 22

Были нанесены износостойкие покрытия нитрида титана и алюмонитрида титана с помощью составного катода Ti + Al с соотношением $S_{Al}/S_{Ti} = 0,149$ на сверла из стали P6M5 диаметром 5 мм.

Износостойкость сверл проверялась путем определения максимального количества просверленных отверстий в пластине из нержавеющей стали толщиной 5 мм до переточки.

Результаты испытания приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытания сверл

Покрытие	Нет	TiN	TiAlN
Количество отверстий	332	534	964

По полученным данным видно, что износостойкость сверл с покрытиями TiN и TiAlN примерно в 1,6 и 2,9 раза соответственно, выше, чем у сверла без покрытия.

В результате исследования данного покрытия установлено следующее: покрытие из TiAlN значительно превышает по износостойким характеристикам покрытие из TiN.

Катоды второго типа (с запрессованным алюминием) показали лучшие технологические свойства.

К недостаткам относится увеличение времени нанесения покрытия.

Список литературы

1 **Барвинок, В. А.** Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления / В. А. Барвинок, В. И. Богданович. – М. : Машиностроение, 1999. – 309 с.

2 **Табаков, В. П.** Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В. П. Табаков. – М. : Машиностроение, 2008. – 311 с.

3 **Локтев, Д. А.** Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий / Д. А. Локтев, Е. А. Ямашкин // Наноиндустрия. – 2007. – Вып. 4.

4 Снижение содержания макрофракций в вакуумно-дуговом осаждении покрытий / Д. А. Карпов [и др.]. – СПб. : Науч.-исслед. ин-т электрофиз. аппаратуры им. Д. В. Ефремова, 2009. – 55 с.

УДК 621.793.7:669.28

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

Р. Х. САЙДАХМЕДОВ

*Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан*

Г. Р. САЙДАХМЕДОВА

*Туринский политехнический университет в г. Ташкенте, г. Келес
Республика Узбекистан*

Предложена математическая модель распределения напыляемых частиц на поверхности подложки для магнетронной системы распыления и на этой основе рассчитана толщина алюминиевых и никелевых покрытий. При расчете учитывалось расстояние от испарителя до подложки, масса и плотность наносимого материала, кроме того, рассмотрено несколько вариантов расчета толщины покрытий в зависимости от физического механизма процесса напыления.

DETERMINATION OF THE THICKNESS OF FUNCTIONAL COATINGS FORMED BY THE ION-PLASMA METHOD

R. KH. SAYDAKHMEDOV, G. R. SAIDAKHMEDOVA

In the article a mathematical model of the spray particles distribution on the substrate surface for a magnetron sputtering system, and on this basis calculated thickness of the aluminium and nickel coatings. The calculation took into account the distance from the evaporator to the substrate, the mass and density of the coating material. Furthermore, it was considered several options for calculating the coating thickness, depending on the physical mechanism of the spraying process.

The technology of applying thin films for various purposes in a vacuum environment has become widespread in the intensively developing modern industry,

in particular, microelectronics, optical industry, mechanical engineering and instrumentation, due to the fact that, in comparison with other known methods of applying functional coatings, it makes it possible to obtain coatings from almost all metals and alloys. The possibility of obtaining a coating on products from polymer bases without changing their original dimensions and properties, and, importantly, coatings obtained by the vacuum-magnetron method are distinguished by a high degree of purity, which is ensured by efficient air evacuation and low pressure in the vacuum chamber, as well as high speed precipitation of evaporating substances, which can significantly improve the consumer properties of products, which is the most relevant and in demand today.

For the development of technological processes for applying functional coatings in vacuum, it is important to determine and predict such fundamental factors as coating thickness. The presence of the coating thickness largely determines the operational properties of products with coatings. In turn, the coating thickness is regulated by such technological parameters as: distance from the evaporator to the substrate; mass and density of the deposited material on a flat (uneven) substrate under various modes (electrical, technological parameters; design features of the installation and sputtering system) of the operation of the magnetron sputtering installation. Ensuring obtaining a high-quality coating on products depends on a pre-planned (predictable) and scientifically substantiated technological process of coating application. Therefore, the prediction of the design parameters of protective coatings and, on this basis, the development of technologies for the formation of coatings is an urgent task.

The purpose of this work is to develop a mathematical model and algorithm for a software product that allows calculating the thickness of vacuum functional coatings for given technological parameters. The objectives of the work are to determine the thickness of vacuum coatings based on Al and Cr obtained by magnetron sputtering.

Given the above, it is noted that the effect of vacuum ion-plasma coating on the part error is determined by the following reasons: part heating, coating thickness error, presence of residual stresses in the coating, coating thickness variation over the entire surface of the part [1–3]. The accuracy of the shape of cylindrical parts, the error of the coating thickness, depending on the size of the area of the hardened parts, were studied. When applying the TiN coating, the cylindrical bushings were arranged parallel and perpendicular to the plasma flow. It is noted that when coatings are applied to cylindrical surfaces that are parallel to the flow axis, there is a deviation of the profile of the longitudinal section – cone shape, and when the cylindrical surface is located perpendicular to the flow, the error will be the deviation of the profile of the longitudinal section – barrel shape. It is shown that the deviation of the part shape (ovality) after coating is equal to the

initial ovality of the part, and the error in the thickness of ion-plasma coatings depends on the number of parts installed on the holder and their location [1].

Depending on the functional purpose, the thickness of the coatings can vary from a few to tens of microns. In particular, the performance properties of multi-component and multilayer ion-plasma coatings based on titanium, chromium, and vanadium nitrides were studied in [4, 5]. It should be noted that a thin sublayer of metallic material up to approximately 1 μm was deposited on the substrate surface before the deposition of the nitride coating. The influence of the thickness, composition, and structure of coatings on microhardness, brittleness, and adhesive strength of coatings with a base was studied.

The principle of developing a mathematical model and algorithm. The development of a program for calculating certain parameters of vacuum coatings is a complex task, for which various programming languages are used, in our case it is the MATLAB language, which is a high-level interpreted programming language that includes data structures based on matrices, a wide range of functions, an integrated development environment, object-oriented capabilities and interfaces to programs written in other programming languages.

Thus, on the basis of the conducted analytical studies and calculations, the following conclusions can be drawn:

A method has been developed for calculating the pre-planned (predicted) distribution of the coating thickness on a deposited surface during magnetron sputtering of targets parallel to the substrate.

Calculated the thickness distribution of coatings based on aluminum and nickel on the substrate surface on the basis of a computer program.

References

1 **Budilov, V. V.** *Tochnost' detaley mashin pri vakuumnom ionno-plazmennom nanesenii pokrytiya* / V. V. Budilov, V. S. Mukhin, I. I. Yagafarov // *Upravleniye i obrabotka informatsii v slozhnykh sistemakh*. – 2014. – S. 198–202.

2 **Budilov, V. V.** *Tekhnologiya naneseniya vakuumnykh ionno-plazmennyykh pokrytiy na detali GTD vysokoy tochnosti* / V. V. Budilov, R. M. Kireyev, I. I. Yagafarov // *Nanoizheneniya*. – 2013. – № 4 (22). – S. 38–42.

3 **Budilov, V. V.** *Otsenka tochnosti detaley GTD pri ionno-plazmennom nanesenii pokrytiy* / V. V. Budilov, R. M. Kireyev, I. I. Yagafarov // *Izvestiya Vuzov. Aviatcionnaya tekhnika*. – 2012. – № 2. – S. 65–68.

4 **Saydakhmedov, R. KH.** *Ionno-plazmennyye pokrytiya na osnove nitridov i karbidov perekhodnykh metallov s reguliruyemoy stekhiometriyey* / R. KH. Saydakhmedov. – Tashkent : Fan, 2005. – 232 s.

5 **Fetisov, G. P.** *Ionno-plazmennyye nestekhiometricheskiye pokrytiya na osnove nitridov i karbidov perekhodnykh metallov* / G. P. Fetisov, M. G. Karpman, R. KH. Saydakhmedov. – M. : Izd-vo MAI-PRINT, 2011.

РАЗВИТИЕ КОРРОЗИИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОТНЫХ ВОД ЧЕРЕЗ БЕТОН

Л. В. САМУСЕВА, М. А. ПРАВЕДНАЯ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Самый распространенный вид коррозии – углекислотная коррозия. Углекислый газ во многих случаях действует как агрессор. Поэтому практически всегда присутствующие в воздухе пары CO_2 участвуют во всех коррозионных процессах. Весьма часто они конденсируются на поверхности материала в виде капельножидкой влаги. В природной воде всегда содержится растворенный оксид углерода (IV). Растворяясь в воде, оксид углерода (IV) почти не соединяется с нею. Его гидроксид – угольная кислота H_2CO_3 – существует лишь в момент ее образования. Если при какой-либо реакции угольная кислота получается, она тотчас разлагается на углекислый газ и воду: $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$.

В естественных (грунтовых) водах всегда присутствует углекислота, оказывающая специфическое воздействие на бетон. Причиной присутствия CO_2 в природных водах являются биохимические процессы, протекающие при гниении остатков растительности с образованием гумусовых кислот на разной глубине залегания, происходящие как в самой жидкости, так и в грунте в результате соединения карбонатных осадочных пород, с которым вода постоянно контактирует.

Водородный показатель поверхностных природных вод равен 4,5–8,5, причем чаще он ниже 7. Это обусловлено взаимодействием воды с углекислотой воздуха, что может приводить к значительному снижению показателя рН.

При $\text{pH} < 4,2$ в природных водах содержится только свободная углекислота и ионы HCO_3^- , причем с возрастанием рН увеличивается концентрация HCO_3^- ионов и понижается концентрация свободной угольной кислоты. При $\text{pH} = 8,4$ в воде присутствуют практически только гидрокарбонаты (99,7 %). При дальнейшем увеличении рН в воде наряду с гидрокарбонат-ионами HCO_3^- появляются карбонат-ионы CO_3^{2-} , которые при $\text{pH} > 10$ становятся преобладающими.

Одни из наиболее часто встречающихся деструкций коррозии второго вида – это дефекты бетона, возникающие в результате действия углекислых вод.

Обычно в воде содержится до 150 мг/л угольной кислоты и количество ее зависит от парциального давления CO_2 .

При действии углекислых вод на бетон протекают процессы перехода коррозии второго вида в коррозию первого вида, которая и является причиной разрушения фильтрующегося бетона (рисунок 1 [1]).

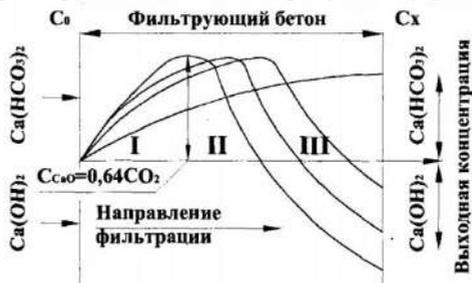
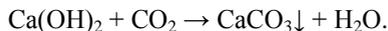


Рисунок 1 – Схема последовательного развития углекислотной коррозии при фильтрации углекислых вод через бетон:
 I – зона разрушения (образование бикарбонатов); II – зона уплотнения (выпадение карбонатов в осадок); III – зона выщелачивания

Коррозия начинается не сразу, вначале образуется карбонат кальция (CaCO_3) – нерастворимое соединение. Гидроокись кальция в поверхностных слоях бетона, соединяясь с углекислотой воздуха, превращается в углекислый кальций (известняк). Происходит так называемая карбонизация бетона:



Бетон при этом уплотняется, а щелочность его снижается с $\text{pH} = 12 \dots 12,5$, характерной для насыщенного раствора извести, до 9, характерной для водной вытяжки известняка.

Далее $\text{CaCO}_3\downarrow$, нерастворимый в воде и щелочах, легко разрушается углекислыми водами:



Образующийся при этом кислый углекислый кальций (бикарбонат) имеет высокую растворимость, из бетона постепенно уходит CaCO_3 и прочность бетона в этом месте ослабляется (поскольку бикарбонат проходит в глубь конструкции).

Скорость углекислотной коррозии зависит:

- от концентрации H_2CO_3 , Ca^{+2} и HCO_3^- ;
- от условий омывания конструкции (под напором или нет);
- от свойств самого бетона.

Следовательно, определяющим фактором скорости происходящих разрушений является концентрация углекислоты в растворе. Чем больше H_2CO_3 , тем выше кислотные характеристики раствора и скорость углекислотной коррозии.

Наиболее стоек к углекислотной коррозии глиноземистый цемент. Для предотвращения углекислотной коррозии в состав бетона (в качестве заполнителя) вводится до 25 % тонкомолотого известняка.

В реальных конструкциях процесс коррозии бетона оценивается по результатам анализа продуктов фильтрации: если в фильтрате обнаруживается $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, то это свидетельствует о развитии коррозии. Безопасным для бетона считается раствор углекислоты с содержанием $\text{CO}_2 < 15$ мг/л и скоростью фильтрации менее 0,1 м/с [2].

Отметим, что при концентрации растворов кислот выше 0,0001 н. практически все цементные бетоны, за исключением кислотоупорных, быстро разрушаются. Однако при этом более стойкими оказываются бетоны плотной структуры на портландцементе.

Список литературы

- 1 **Панталеенко, В. Н.** Строительные материалы : учеб. пособие / В. Н. Панталеенко, Л. А. Ерохина, Е. М. Верякина. – 2-е изд., стер. – Ухта : УГТУ, 2012. – 166 с.
- 2 **Баженов, Ю. М.** Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1978. – 455 с.

УДК 678.07:539.375

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ

О. А. САРКИСОВ

*Лаборатория дефектоскопии и диагностирования оборудования
Производственное управление нефтепромыслового и бурового сервиса
РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Речица*

Н. Н. РАДКОВИЧ

*Общество с ограниченной ответственностью «М-НЕРУД»,
г. Владимир, Российская Федерация*

Одним из эффективных направлений методов поверхностной модификации полимерных материалов является применение их при обработке резинотехнических элементов узлов пневмо-, гидросистем, а также герметизирующих уплотнений в различных кинематических узлах (коробках передач автомобилей, узлах станков и др.). Такие методы дают возможность направленного изменения свойств резин (снижение коэффициента трения, повышение износостойкости, снижение набухания в рабочих жидкостях) без потери эластичности и, как следствие, увеличения ресурса их работы.

В работе исследовались модифицированные различными методами образцы резины марки СКН-26 на основе бутадиен-нитрильных каучуков. Выбор исследуемого материала обусловлен его широким применением при производстве резинотехнических элементов в технике.

В качестве методов обработки резин использовали нанесение слоя эпилама, выпускаемого под торговой маркой «Фолеокс» методом окунания, обработку в плазме тлеющего разряда, обработку пучком ионов азота, получаемого с помощью ионного источника типа «Радикал», нанесение покрытия политетрафторэтилена (ПТФЭ) методом электронно-лучевого диспергирования исходного полимера в вакууме, в некоторых случаях при обработке образцы резин подвергались растяжению. Также эти методы применялись в различных комбинациях.

Исследование модифицированных резин показало, что обработка в плазме тлеющего разряда и пучков ионов азота резины приводят к идентичному эффекту – повышению поверхностной энергии, величина которой зависит от дозы обработки и повышается более чем в 2 раза. Также установлено, что предварительная обработка в ультразвуковой ванне со щелочной средой не дает дополнительного эффекта. Такие методы обработки могут быть эффективно использованы в качестве предварительной операции перед нанесением модифицирующих покрытий.

Исследование на возвратно-поступательном микротрибометре позволило определить наиболее эффективный из перечисленных методов модификации резин. Обработка ионами азота, предварительное растяжение и последующее нанесение ПТФЭ позволило в 2,5 раза снизить коэффициент трения и более чем в 2 раза снизить линейный износ по сравнению с исходной резиной. Остальные приведенные методы обработки менее эффективны или кратковременно сохраняют модифицирующий эффект.

УДК 621.181.27:662.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТИ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ ВАРИАЦИЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

А. З. СКОРОХОД

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

М. АБДУСАМАТОВ

*Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии
Национальной академии наук Таджикистана, г. Душанбе*

Новые материалы, которые получают в результате изменения соотношения ингредиентов в уже существующих композитах, открывают широкие возможности для реализации перспективных конструктивных решений уз-

лов трения, разработки новых технологических процессов формирования композитов в изделия и эффективных методов прогнозирования их свойств. От точности прогнозирования физико-механических и триботехнических характеристик эпоксикомпозитных материалов, которые используют во время фрикционного взаимодействия при различных условиях и нагрузках, зависит возможность создания материалов с заранее заданными свойствами. К ним относятся эксплуатационная надежность узлов трения благодаря сохранению исходного сопряжения, долговечность их работы, технологичность по восстановлению поверхностей трения и др. Следовательно, разработка новых моделей прогнозирования триботехнических характеристик, основанных на современных теориях [1], которые позволяют с высокой точностью определять свойства вновь создаваемых материалов и изделий из них, является актуальной задачей современного материаловедения, решение которой сокращает срок испытаний на износоустойчивость.

В качестве объекта исследования выбрали эпоксидный олигомер марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84). Для его сшивания использовали отвердитель полиэтиленполиамин (ТУ 6-05-241-202-78).

В качестве наполнителя выбрали оксид алюминия дисперсностью 43 мкм. Образцы формировали методом гидродинамического совмещения компонентов. Отверждали образцы при температуре $T = 293 \pm 2$ К в течение 24 часов, после чего их дополнительно термообработывали в течение 2 часов при 393 ± 2 К с последующей механической обработкой для придания им необходимой формы и размеров. Триботехнические характеристики материалов исследовали при вращательном движении в паре со стальным (HRC 40...45) цилиндрическим контртелом (40 мм) при скорости скольжения $v = 0,5$ м/с и удельной нагрузке $P = 0,5$ МПа согласно методике, приведенной в [2]. Толщина покрытия 1 мм, ширина дорожки трения 10 мм (рисунок 1).

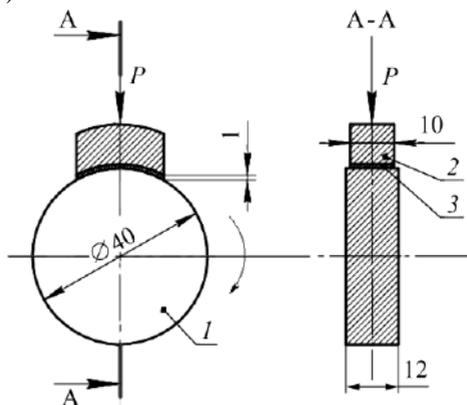


Рисунок 1– Схема для испытания триботехнических свойств материала:
1 – контртело; 2 – образец; 3 – покрытие из испытываемого материала

Интенсивность изнашивания определяли по формуле

$$I = \frac{\Delta m}{L \cdot \rho \cdot S} \cdot 10^{-16}, \quad (1)$$

где Δm – массовый износ, кг; L – путь трения, м; ρ – плотность материала, кг/м³; S – площадь трения, м².

На первом этапе исследовали физико-механические и триботехнические характеристики эпоксикомпозитов в зависимости от содержания наполнителя, а именно: модуль упругости E , твердости H , коэффициент трения f и интенсивность износа I . Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость физико-механических и триботехнических характеристик эпоксикомпозитов от содержания оксида алюминия на 100 м. ч. связующего

Содержание оксида алюминия, м.ч.	5	30	40	60	70	100
$I \cdot 10^9$	37	32	36	40	24	13
f	0,58	0,35	0,45	0,48	0,44	0,36
$E \cdot 10^{-2}$, МПа	35	40	50	62	69	80
H , МПа	330	220	210	235	260	335
$E \cdot I$	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$2,98 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$2,88 \cdot 10^{-4}$
$f_{тр} \cdot E/H$	$6,15 \cdot 10^{-7}$	$6,36 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$1,27 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$8,60 \cdot 10^{-7}$

Далее построили модель, описывающую зависимость интенсивности износа эпоксикомпозитов от концентрации наполнителя q . Интенсивность износа является безразмерной величиной, которая зависит от объема изношенного материала, площади трения, скорости скольжения, длины дорожки трения, удельной массы композита. Два физических явления подобны, если по числовым значениям характеристик одного явления можно получить числовые значения характеристик другого с помощью простого пересчета, который аналогичен переходу от одной системы единиц измерения к другой. Для перерасчетов необходимо знать переходные масштабы. Таковыми являются безразмерные коэффициенты системы уравнений (2).

$$\begin{aligned} 5 \cdot x_1 + 0,58 \cdot x_2 + 3500 \cdot x_3 + 330 \cdot x_4 &= 37 \cdot 10^{-9}, \\ 30 \cdot x_1 + 0,35 \cdot x_2 + 4000 \cdot x_3 + 220 \cdot x_4 &= 32 \cdot 10^{-9}, \\ 60 \cdot x_1 + 0,48 \cdot x_2 + 6200 \cdot x_3 + 235 \cdot x_4 &= 40 \cdot 10^{-9}, \\ 100 \cdot x_1 + 0,36 \cdot x_2 + 8000 \cdot x_3 + 335 \cdot x_4 &= 13 \cdot 10^{-9}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_1 - x_4$ – вектор-столбцы неизвестных.

Согласно П-теореме, уравнения системы (2) содержат безразмерные коэффициенты и размерные величины, качественно описывающие износ. Другими словами, линейная комбинация безразмерных числовых характеристик левой части каждого из уравнений является переходным масштабом для определения безразмерных величин в правой части каждого из уравнений.

Систему (2) можно записать в виде

$$A \cdot X = B, \quad (3)$$

$$\text{где } A = \begin{pmatrix} 5 & 0,58 & 3500 & 330 \\ 30 & 0,35 & 4000 & 220 \\ 60 & 0,48 & 6200 & 235 \\ 100 & 0,36 & 8000 & 335 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 37 \\ 32 \\ 40 \\ 13 \end{pmatrix} \cdot 10^{-9}, X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}.$$

Поскольку матрица $A_{i,j}$ не вырождена ($\det(A_{i,j}) \neq 0$), то система имеет решение. Решение (3) будем искать матричным методом: $x_i = A_{i,j}^{-1} \cdot B_j$, где x_i – компоненты вектор-столбца неизвестных. Решение (3) получено с использованием программного обеспечения MatCAD (версия MatCAD 14).

Теория подобия показывает, что любую функциональную зависимость между физическими параметрами исследуемого объекта можно представить в виде зависимости между критериями подобия, которые составлены из физических параметров. При этом эти критерии являются безразмерными параметрами, которые характеризуют физическое подобие процессов в исследуемом объекте, и константами для всех подобных процессов.

Поэтому определим безразмерный коэффициент механических характеристик, где суммирование по i не происходит ($i = 1 \dots 4$).

Вычислив, получим столбец коэффициентов:

$$L_i = \begin{pmatrix} 9,273 \\ 9,593 \\ 19,09 \\ 12,96 \end{pmatrix} \cdot 10^{-8}. \quad (4)$$

Формула (4) качественно описывает поведение кривой износа полимерного материала как функцию концентрации наполнителя. Причем описание механических характеристик представлено без учета масштабного фактора. Методом регрессионного анализа определим аналитический вид функции, описывающей зависимость интенсивности износа полимерного материала от концентрации наполнителя. Запишем исходные данные, полученные экспериментальным путем: $X = A^{-1}$, $Y = B$. Методом полиномиальной регрессии определим аналитический вид функции $f(x)$, которая описывает поведение экспериментальных точек. Степень аппроксимирующего полинома – 3. С использованием оператора regress программы MathCAD, которая создает

единый многочлен, коэффициенты которого рассчитывают на основе совокупности заданных точек, находим коэффициенты:

$$\text{coeffs} = \begin{pmatrix} 4135 \\ -101,7 \\ 3,042 \\ -0,023 \end{pmatrix} \cdot 10^{-11}. \quad (5)$$

Среднеквадратичное отклонение «облака» точек равно 1. Запишем уравнение регрессии:

$$f(x) = -2,309 \cdot 10^{-13} x^3 + 3,042 \cdot 10^{-11} x^2 - 1,017 \cdot 10^{-9} x + 4,135 \cdot 10^{-8}. \quad (6)$$

На рисунке 2 приведены кривые, построенные по экспериментальным точкам и уравнению регрессии (6).

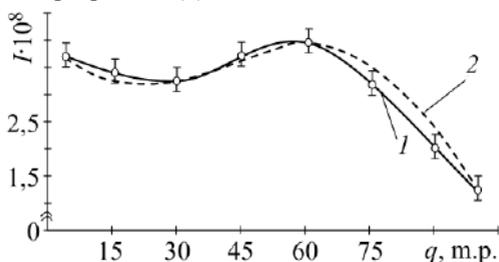


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности износа эпоксикомпозитов от концентрации Al_2O_3 :
1 – экспериментальная зависимость; 2 – согласно уравнению регрессии (7)

Как видим, теоретическая и экспериментальная кривые совпадают в пределах погрешности эксперимента. При большем наполнении свыше 100 м. ч. на 100 м. ч. связующего эксперименты не проводили в связи с неполным смачиванием наполнителя связующим.

Используя основные положения теории подобия, качественно оценили интенсивность износа полимерных материалов на основе их характеристик, в том числе коэффициента трения. Такая методика дает возможность не выполнять длительные эксперименты, связанные с исследованиями интенсивности износа, а также оптимизировать концентрацию наполнителя, учитывая физико-механические характеристики композита.

Список литературы

- 1 Алтоиз, Б. А., Физика приповерхностных слоев / Б. А. Алтоиз, Ю. М. Поповский. – Одесса : Астропринт, 1995. – 154 с.
- 2 Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки триботехнических свойств материалов на основе полимеров: МР 74-82. – М. : ВНИИНМАШ, 1982. – 14 с.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТЕКЛОПОЛНЕННОГО ПОЛИАМИДА 46 ПРИ ТРЕНИИ В ПРИСУТСТВИИ НЕЗАКРЕПЛЕННОГО АБРАЗИВА

В. А. СТРАТАНОВИЧ, А. С. БРУНДУКОВ, И. С. ШИЛЬКО
Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель

Снижение ресурса техники вследствие разрушений, вызванных абразивным износом, обуславливает необходимость применения специальных конструкционных материалов, среди которых особое место занимают стеклопластики.

Абразивное изнашивание незакрепленной массой происходит при наличии на трущихся поверхностях абразивных частиц, образующихся при эксплуатации техники. Абразивные частицы зачастую сами являются продуктами износа (частицами из структурных составляющих микрообъемов материалов) или же являются продуктами окружающей среды (песок, пыль и др.) [1, 2].

В рамках настоящей работы был исследован полиамид 46 (ПА) марки Stanyl TW341 производства Royal DSM N.V (Нидерланды) наполненный стекловолокном (СВ) марки EC13 2400H-30A(400) аппретированным силиконовым замасливателем производства ОАО «Полоцк-Стекловолокно» (Республика Беларусь). Содержание СВ составляло 35, 37, 40 и 58 мас. %. Экспериментальные образцы получали методом литья под давлением. Исследования проводились на дисковой машине трения торцевого типа ЛКИ-3. В качестве абразива применялись частицы кварца фракцией менее 0,5 мм. Нагрузка на образцы составляла 1–5 Н. Продолжительность эксперимента составляла 10 минут при линейной скорости перемещения образца 0,33 м/с.

Используя данные о потере массы Δm , плотности материалов ρ , а также площади контакта образца и контртела A_a , определяли износостойкость по формуле [1]

$$\varepsilon = 1 / I_h = \frac{\rho A_a L}{\Delta m}.$$

На рисунке 1 представлен график зависимости износостойкости композиций с различным содержанием стекловолокна от прикладываемой нагрузки.

Для композиций с концентрациями СВ в количестве 35 и 37 мас. % наиболее интенсивное снижение износостойкости протекает при нагрузках 1–3,5 Н. При данной нагрузке частицы абразива взаимодействуют с полимерным материалом в процессе перемещения, однако усилия для закрепле-

ния в зоне контакта недостаточно. В результате сохранения возможности переориентирования в процессе трения абразивные частицы регулярно проворачиваются и при постоянном взаимодействии с поверхностью образца оставляют царапины.

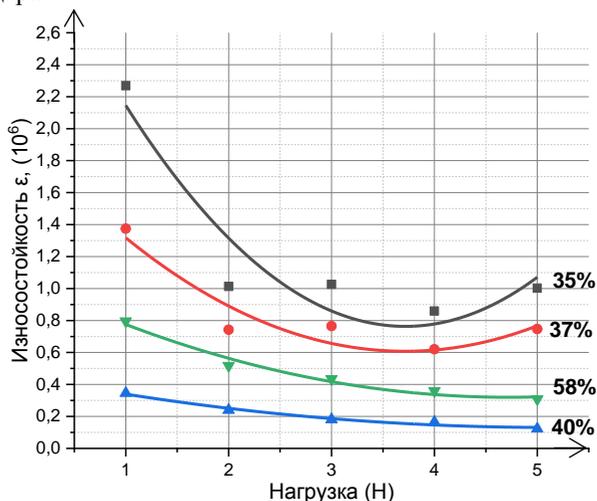


Рисунок 1 – Зависимость износостойкости от нагрузки композиций на основе ПА 46 с различным содержанием стекловолокна (%) при трении в присутствии незакрепленного абразива

При дальнейшем нагружении для рассматриваемых композиций характерно увеличение износостойкости. Абразивные частицы внедряются глубже в объем материала и частично утрачивают возможность переориентирования. В результате увеличивается доля контакта закрепленного абразива с незакрепленными частицами, при этом общий износ материала снижается.

Для концентраций СВ в количестве 40 и 58 мас. % зависимость износостойкости от прикладываемой нагрузки принимает вид, близкий к линейному, и для них характерны наименьшие значения износостойкости. Объясняется это тем, что с увеличением концентрации СВ происходит увеличение числа межфазных границ раздела, по которым происходит разрушение материала, что приводит к более интенсивному отделению материала.

В случае 58 мас. % наполнения, СВ в материале становится настолько много, что в процессе перемещения образца в контакт с абразивом вступают непосредственно стеклянные волокна, а не полимерная матрица. В связи с этим износостойкость композиции с 58 мас. % наполнением СВ несколько выше, чем для 40 мас. %.

Установлены основные закономерности износа стеклонаполненных полимерных композиционных материалов на основе полиамида 46. Наиболее из-

носостойким является материал с концентрацией 35 мас. % СВ ($\epsilon = 2,27 \cdot 10^6$). Однако для указанной композиции с увеличением нагрузок во всем экспериментальном диапазоне наблюдается наиболее резкое снижение износостойкости по сравнению с другими материалами (см. кривые на рисунке 1).

Список литературы

1 **Богданович, П. Н.** Трение, смазка и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак, С. П. Богданович. – Минск : Тэхналогія, 2011. – 527 с.

2 **Росляков, В. И.** Методы повышения трибологической надёжности бытовых машин и приборов / В. И. Росляков // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2007. – Т. 4, № 14. – С. 41–44.

УДК 678.7:535-31

УСТАНОВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ НАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В. Б. ХОДЕР, Е. И. КОРДИКОВА

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

На современном этапе развития машиностроения передовыми являются технологии аддитивного производства изделий, которые дают возможность в кратчайшие сроки получить опытный образец сложного изделия и позволяют выпускать единичные, сложные изделия гораздо дешевле, чем при традиционном производстве, при этом экономически оправданным становится производство малых и даже средних серий [1, 2].

Разработка композиционных материалов для современных технологий аддитивного синтеза является немаловажным аспектом развития производственного сектора на территории Республики и за её пределами.

Одним из важнейших вопросов на этапе получения новой композиции является определение условий и времени хранения исходного сырьевого материала и композиционной системы.

Матрица характеризует непрерывную пространственную фазу, ответственную за сохранение конфигурации изделия, передачу эксплуатационных нагрузок на арматуру и сопротивление действию других внешних факторов [3], а потому является основой первоочередной фазы, определяющей условия и сроки хранения.

Вместе с тем наполнитель и его взаимодействие с матричной фазой может влиять на сроки хранения материала, чаще в сторону снижения продолжительности, и устанавливать необходимость подготовительных этапов.

Целью работы является изучение влияния наполнителя и условий хранения готовой композиции на качество напечатанных изделий методом лазерной стереолитографии.

В качестве материала для исследования применяли фотополимерную смолу Formlabs Clear и измельченные частицы отвержденной смолы Formlabs различных марок (Clear, Gray, White) с фракцией 20–40, 40–50, 50–60 мкм, а также композиционные системы с наполнением 10 и 20 мас. % (рисунок 1).

Сырьевые материалы и композиционные системы хранили в рекомендуемых производителем условиях [4]: при относительной влажности воздуха 50 ± 10 %, в закрытом от попадания УФ-излучения месте, при температуре 10–35 °С, а также при пониженных температурах 5–10 °С.

Высокое содержание влаги в наполнителе может отрицательно сказываться на процессе смешения композиционной суспензии, на взаимодействии компонентов в композиции и дальнейшем отверждении. Взаимодействие молекул воды с составляющими фотополимерной смолы приводит к отщеплению водорода и последующему обрыву цепи, а также образованию пузырей воздуха и прочих дефектов.

Оценку влагосодержания наполнителя проводили на выборках порошка с диапазоном времени 10, 48, 92, 210 и 420 сут от процесса измельчения.

По результатам испытаний обнаружено, что влажность всех порошков составляет ~1 %, что является оптимальным для используемого наполнителя. Коэффициент вариации эксперимента составляет менее 0,3 %, что говорит о точности проведенного испытания.

При исследовании системы визуально и микроскопическим методом каждый из материалов характеризовался высокой степенью равномерности распределения частиц наполнителя в матрице. Поверхностный слой исследуемых образцов во всех случаях не имеет пленок и налетов, а также образует вогнутый мениск, что описывается как поведение смачивающей жидкости. В объеме композиции присутствует незначительное количество пузырей воздуха.

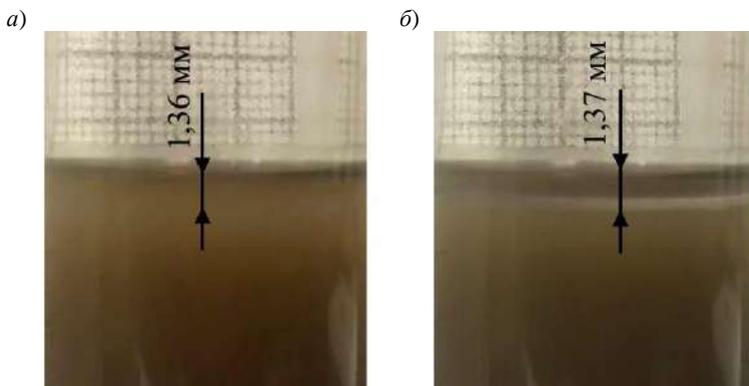


Рисунок 1 – Высота отслоения для композиционной системы при отстаивании 92 суток (а – 10 мас. % ; б – 20 мас. %)

При первичном визуальном исследовании не замечено расслоение композиции: наличие осадка или отслоения жидкой фазы. По истечении 48 часов на поверхности композиционной системы происходит расслоение материала с общей высотой 0,85–1 мм. Пузыри воздуха в процессе отстаивания полностью удаляются из системы, аэрации не наблюдается. Отмечается, что увеличение содержания наполнения незначительно повышает высоту отстаивания.

В результате проведения оптического наблюдения композиционных составов с размерами частиц 20–40 и 40–50 мкм при разных условиях хранения сроком в 426 суток (14 месяцев) осаждения наполнителя не выявлено, однако отслоение чистого материала на поверхности возросло до 1,42 мм. При этом отмечено, что снижение температуры хранения позволяет снизить данный показатель на 2–6 %, а повышение размера частиц наполнителя незначительно увеличивает высоту расслоения.

Вместе с тем частицы с размером фракции 50–60 мкм отслаиваются от композиции значительно активнее. На конец эксперимента высота отслоения для данной системы составила 23 мм.

Микроскопическое исследование композиции во все периоды наблюдения не позволяет выявить видимые изменения в структуре. Предполагается, что равномерное распределение частиц в жидкой фазе остается практически неизменным за счет высокой вязкости смолы и её повышения при пониженных температурах, а также сил межфазного взаимодействия. Наблюдение дна емкостей через просвет позволяет сделать вывод об отсутствии видимого осадка в композиции.

Особое внимание привлекает возможность прохождения специфических химических реакций в системе в процессе отстаивания и набухания наполнителя. В образцах с наполнением частицами с размером 40 мкм и содержанием 20 мас. % при хранении при комнатной температуре отмечено образование плотной массы полутвержденного материала, возрастающей в объеме от центральной области. Данный фактор наблюдался в 60 % испытываемых образцов и требует проведения дополнительных исследований.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности хранения сырьевых материалов для дальнейшего смешения, а также наполненной композиции в течение жизнеспособности полимерной матрицы. Во избежание чрезмерного отстаивания композиции рекомендуется применять закрытое от ультрафиолетовых лучей темное место с влажностью не более 50 ± 10 % и при температурах 5–10 °С. Перед печатью производить тщательное перемешивание композиции.

Список литературы

1 Давиденко, А. А. Аддитивное производство набирает обороты / А. А. Давиденко // Аддитивные технологии. – 2017. – № 1. – С. 24–28.

2 Кукушкин, В. А. Аддитивные технологии в машиностроении / В. А. Кукушкин // Аддитивные технологии. – 2017. – № 1. – С. 20–23.

3 **Бондалетова, Л. И.** Полимерные композиционные материалы (Ч. 1): учеб. пособие / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.

4 Formlabs. Resin Library and 3D-printing Materials. Data Sheets [Electronic resource]. – Режим доступа : <https://formlabs.com/materials/>. – Дата доступа : 14.03.2023.

УДК 621:678.073:678.046

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*В. М. ШАПОВАЛОВ, Н. С. ВИНДИКТОВА, М. А. КОВАЛЕНКО,
К. В. ОВЧИННИКОВ*

*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

Одним из направлений применения композиционных материалов является использование в транспортных системах в качестве отделочных материалов. Широкое распространение для этих целей получили материалы на основе полипропилена (ПП), полиэтилена (ПЭ), полиуретана, АБС-пластика и др. Недостатком таких материалов является проблема их утилизации, что существенным образом ухудшает экологическую обстановку. В настоящее время в условиях реализации стратегии экологически ориентированного роста развитые страны ускоренными темпами развивают экологически чистые или «зеленые» технологии, которые охватывают практически все сферы деятельности человека. Таким образом, перспективным является создание инновационных технологий по снижению негативного воздействия на окружающую среду [1–3].

Цель работы – разработать биоразлагаемый композиционный материал для отделочных материалов в машиностроении.

Создание композиционных материалов с возможностью их полной биодеградации, сохраняющих приемлемые потребительские свойства и стоимость конечного изделия, является актуальным. Для решения поставленной задачи использовали полилактид (Nature Works®Biopolymer 4043D (США)) в сочетании с лигноцеллюлозными наполнителями.

Выбор полилактида в качестве связующего обоснован его способностью к биоразложению, физико-механическими характеристиками, близкими по отношению к ПЭ и ПП, а также возможностью переработки классическими методами.

В качестве наполнителя использовали лигноцеллюлозу – растительное сухое вещество, которое является самым доступным сырьем на Земле. Лиг-

ноцеллюлоза является малоценным побочным продуктом различных отраслей промышленности, например, сельского хозяйства (кукуруза, солома и пр.), лесного хозяйства (отходы лесопильных и бумажных заводов) и т. д.

Получение композиции производили механическим смешением лигноцеллюлозного наполнителя, мелкодисперсных древесных частиц (размер частиц до 0,8 мм), с полилактидом при комнатной температуре. Процентное содержание наполнителя составляло от 50 до 80 мас. %. Композиционный материал получали экструзионной переработкой на лабораторном экструдере Rheocord 90 (НААКЕ). Далее методом пласт-формования изготавливали образцы в виде таблеток диаметром 2 см. Образцы подвергали испытаниям на водопоглощение. После испытаний проводили визуальную оценку структурной однородности образцов после экспозиции в воде (95 °С) в течение 15 минут, последующим остыванием до комнатной температуры.

Экспериментально установлено, что при содержании в композиции наполнителя 50–80 мас. % возможна ее переработка методом экструзии. Из полученного композита методом пласт-формования изготавливали образцы, представленные на рисунке 1.

Из рисунка видно, что после выдержки в воде образцы с содержанием наполнителя 50 мас. % сохраняют форму и пространственную жесткость. При этом водопоглощение составляет 15 %, а изменение линейных размеров не превышает 5 %. Существенные структурные изменения наблюдаются у образцов с содержанием наполнителя 80 мас. %, а изменения формы и размеров происходят практически сразу после погружения образцов в воду, а водопоглощение составило 40 %. Менее существенные структурные изменения отмечены у образцов с содержанием наполнителя 70 мас. %, при этом их показатель водопоглощения составляет около 20 %.

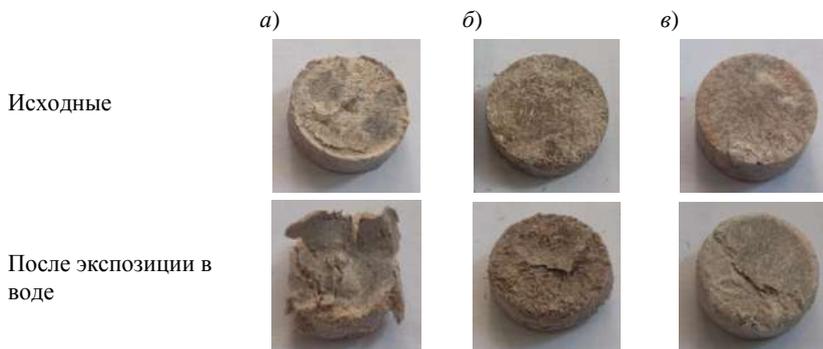


Рисунок 1 – Образцы биоразлагаемых композиционных материалов с наполнителем (% мас.):
а – 80; б – 70; в – 50

По результатам визуальной оценки исходных образцов и после экспозиции в воде можно отметить, что в образцах с 80 мас. % наполнением связующее распределено недостаточно равномерно. Это позволяет предположить, что при изготовлении таких образцов необходимо введение функциональных добавок, обеспечивающих улучшение технологических параметров переработки композитов. Для этого требуются дополнительные исследования, что указывает на перспективность проводимых работ.

Экспериментально показано, что биоразлагаемые композиты на основе полилактида, высоконаполненные лигноцеллюлозными (50–70 мас. %) частицами возможно перерабатывать методом экструзии с последующим пласт-формованием в изделия. Оценка устойчивости композита к водопоглощению свидетельствует о возможности их применения для получения отделочных материалов в машиностроении.

Список литературы

1 Сроки разложения бытовых отходов [Электронный ресурс] // Электронная экологическая библиотека. – 2021. – Режим доступа : <https://ecology.aonb.ru/sroki-razlozhenija-bytovyih-othodov.html>. – Дата доступа : 17.05.2021.

2 Крутько, Э. Т. Технология биоразлагаемых полимерных материалов : учеб.-метод. пособие / Э. Т. Крутько, Н. Р. Прокопчук, А. И. Глоба. – Минск : БГТУ, 2014. – 105 с.

3 Все о биоразлагаемых пластиках. Мировой рынок биополимеров – 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ect.center.com/blog/biodegradable-polymers>. – Дата доступа : 23.05.2021.

УДК 621.762

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТОГО МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА С ДИСПЕРСНЫМ ПОРОШКОВЫМ СЛОЕМ ОТ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

А. Н. ШВЕЦОВ, Ю. Л. БОБАРИКИН

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,
Республика Беларусь*

Одним из перспективных методов нанесения износостойких порошковых покрытий является метод электроимпульсного спекания [1–3]. Он заключается в электроконтактном припекании порошкового материала к поверхности стальной полосы. В зону припекания порошок подается в свободно-насыпанном состоянии, где он одновременно спекается в слой покрытия и припекается к поверхности полосы. Полосы с покрытием используются для дальнейшего изготовления из них подшипников скольже-

ния различных конструкций. Основными преимуществами этого метода являются: высокая производительность, низкая энергоёмкость, возможность получения спечённых изделий с незначительной пористостью. Основная проблема этой технологии заключается в достижении требуемых прочностных свойств композита в зависимости от технологических режимов. Прочностные свойства слоистого композита определяются величиной угла перегиба, при котором наступает разрушение материала.

Цель данной работы – получение зависимости технологических свойств слоистого металлополимерного материала с дисперсным порошковым слоем от режимов электроимпульсной обработки

Получение слоистого композита имеет следующие этапы:

1 Подготовка поверхности полосы-подложки. Для увеличения адгезионного взаимодействия «сырого» слоя и полосы-подложки, а также исключения применения специальных флюсов при спекании, полоса-подложка подвергается механической обработке. На ней создается с помощью металлических щеток шероховатость (Rz 60).

2 Предварительное формование. На стальную полосу-подложку насыпается слой порошковой шихты и прокатывается между двумя прокатными валками на прокатном стане. Для обеспечения точной дозировки шихты используется дозирующее устройство. Метод предварительного формования позволяет избежать выноса ферромагнитных порошков из зоны контакта при последующем спекании, т. к. ферромагнитные включения находятся в спрессованном состоянии.

3 Электроимпульсное спекание. Полоса с «сырым» слоем прокатывается между двумя прокатными валками-электродами, подключёнными к сварочному трансформатору. Эта операция обеспечивает спекание «сырого», предварительно спрессованного порошкового слоя и одновременно его припекания к поверхности стальной полосы.

4 Калибровка прокаткой. Завершающей операцией является калибровка путём прокатки полосы в размер.

В качестве материала-покрытия для проведения экспериментов по данной технологии использован композиционный материал, включающий в себя порошковые компоненты: 70 мас. % Fe, 7–10 мас. % Cu, 5–10 мас. % Ni, 5–10 мас. % Sn и 10–15 мас. % омеднённого графита.

Для определения оптимальных технологических режимов получения композиционного покрытия на металлической матрице с ферромагнитными порошковыми компонентами использован статистический метод планирования многофакторного эксперимента [4]. В качестве исследуемой функции отклика был выбран качественный критерий – проверка на адгезию композиционного слоя с полосой-подложкой методом перегиба (α°) и визуальная оценка отсутствия выноса ферромагнитных компонентов из зоны формирования покрытия, а в качестве варьируемых факторов – параметры технологического процесса: среднее абсолютное обжигание при предварительном

формовании и спекании (X_1); скорость вращения валков-электродов (X_2); и сила тока спекания (X_3).

Исследовались образцы с материалом полосы-подложки сталь 08кп, шириной полосы 15 мм и уровнем насыпки порошковой шихты 2 мм. Электроимпульсное спекание проводилось при постоянном давлении 200 МПа, обеспечивающим плотный электроконтакт.

Предварительно методом «крутого восхождения» с учётом технических характеристик экспериментальной установки была экспериментально определена область изменения интервалов варьирования. Дальнейшее исследование совместного влияния варьируемых факторов X_1 , X_2 , X_3 на качество адгезии композиционного слоя с полосой подложки проводилось с помощью метода рототабельного планирования второго порядка.

Согласно рототабельному плану эксперимента было проведено 20 опытов, каждый из которых осуществлялся трижды.

Для проверки однородности дисперсий параллельных опытов использовался критерий Кохрена. Гипотеза об однородности дисперсий была подтверждена при уровне значимости $\alpha = 0,05$, что позволяет использовать регрессионный анализ и провести статистическую обработку полученных результатов эксперимента. Проверка адекватности математической модели проводилась с помощью F-критерия Фишера для уровня значимости $\alpha = 0,05$.

После обработки экспериментальных данных и с учётом значимости коэффициентов уравнения регрессии, которая проверялась по t критерию Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,05$, было получено уравнение регрессии, отражающее влияние факторов на исследуемую функцию:

$$\alpha^0 = -1562,05 + 1526,8X_1 - 1817,2X_2 + 78,7X_3 + 83,3X_1X_2 - 4,8X_1X_3 + 16,7X_2X_3 - 366,9X_1^2 + 757,3X_2^2 - 1,9X_3^2. \quad (1)$$

На основании анализа уравнения (1) можно сделать следующие выводы: адгезия композиционного слоя с полосой-подложкой зависит от среднего абсолютного обжата материала при предварительном формовании и спекании X_1 , скорости вращения валков-электродов X_2 и силы тока спекания X_3 по квадратичной зависимости.

Анализ результатов эксперимента позволяет определить режимы процесса, обеспечивающие угол перегиба 180° , который на основании экспериментальных данных является достаточным условием отсутствия разрушения после последующей штамповки подшипников скольжения из получаемого полосового материала.

После анализа результатов математического планирования эксперимента и на основании проведённых экспериментов можно определить следующие оптимальные режимы процесса, обеспечивающие угол перегиба 180° :

1 Среднее абсолютное обжатие материала при предварительном формовании и спекании: 1,65–1,86 мм.

2 Скорость вращения валков-электродов: 0,8–0,9 м/мин.

3 Сила тока спекания: 19 кА.

Список литературы

1 Ковтун, В. А. Триботехнические покрытия на основе порошковых медно-графитовых систем / В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский. – Гомель : ИММС НАНБ, 1998. – 148 с.

2 Ярошевич, В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещагин. – Минск : Наука и техника, 1982. – 250 с.

3 Дорожкин, Н. Н. Получение покрытий методом припекания / Н. Н. Дорожкин, Т. М. Абрамович, В. И. Жорник. – Минск : Наука и техника, 1980. – 176 с.

4 Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

УДК 621. 762

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И КОБАЛЬТА

А. Н. ШВЕЦОВ, С. В. ШИШКОВ

*Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
Республика Беларусь*

Процесс свивки металлокорда выполняется на канатных машинах, имеющих узлы, работающие в условиях трения скольжения. При этом элементы узлов трения (подшипники скольжения, торцевые антифрикционные шайбы, подтормаживающие фрикционные детали) имеют свой определенный ресурс работы, установленный предприятием – производителем канатных машин. В настоящее время на ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» в качестве фрикционных дисков для работы кабестанов (рисунок 1) используют бронзу марки БрОФ10-1, которая имеет нестабильный коэффициент трения и повышенный износ.

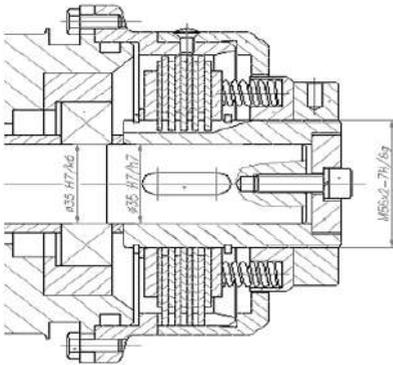


Рисунок 1 – Чертеж кабестана

Для повышения качества технологического процесса получения свивки металлокорда необходимым условием является применение новых материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Особое место занимают порошковые композиционные материалы и покрытия, позволяющие получать широкий диапазон эксплуатационных свойств. По сравнению с другими композиционными

ми материалами, благодаря совокупности положительных свойств металла матрицы и функциональных свойств наполнителей различного назначения, порошковые материалы обладают рядом преимуществ: более высокие прочностные свойства, износостойкость, возможность регулирования фрикционных свойств, высокая технологичность.

Целью работы являлось проведение сравнительных триботехнических испытаний бронзы БрОФ10-1 и порошковых БрОФ10-1+WC-Co композиционных покрытий.

Для получения покрытий использовалась технология электроимпульсного спекания и припекания композиционного материала к металлической подложке, включающая следующие основные этапы [1]:

1 Подготовка поверхности заготовки путём механической обработки с последующим обезжириванием.

2 Подготовка порошковой шихты для композиционного слоя.

3 Нанесение композиционного материала на поверхность стальной основы двумя прокатными валками на прокатном стане.

4 Прокатка полосы с предварительно уплотнённым слоем из фрикционного порошкового материала в валках-электродах, через которые одновременно пропускаются электрические импульсы и создается давление между валками-электродами.

5 Калибровка композиционного фрикционного материала прокаткой для обеспечения величины толщины материала в заданном допуске.

В качестве фрикционного композиционного материала были выбраны три вида порошкового материала со следующим содержанием компонентов в масс. %:

1: БрОФ10-1 – 60 %, W-Co – 40 %;

2: БрОФ10-1 – 40 %, W-Co – 60 %;

3: БрОФ10-1 – 20 %, W-Co – 80 %.

При исследовании микроструктуры выявлено, что покрытие имеет равномерную структуру, а также рабочий слой из частиц W-Co.

Для определения эксплуатационных характеристик полученного материала были проведены испытания на трение и износ.

Триботехнические испытания проводили на машине трения 2070 СМТ–1 по схеме «вал – частичный вкладыш». Приработку проводили при нагрузке 0,3 МПа и скорости 1,5 м/с до образования контакта не менее 80 % всей поверхности трения. Давление в узле трения варьировалось в диапазоне 0,2–1,0 МПа; линейная скорость скольжения составляла 1,5 м/с. Материал контртела – сталь 45 (ГОСТ 1050-88). Коэффициент взаимного перекрытия пары трения вкладыш – ролик составлял 0,125.

По результатам испытаний установлено, что линейная интенсивность изнашивания композиционных порошковых покрытий в сравнении с чистой

бронзой при трении без смазочного материала ниже на 5–24 %, причём с увеличением нагрузки разница в показателе износа увеличивается.

По полученным диаграммам момента трения сделаны следующие выводы:

– по сравнению с диаграммой испытаний бронзового образца, материал, имеющий в своём составе 80 мас. % WC-Co, показал повышенный износ контртела и работает как абразив;

– материал с содержанием БрОФ10-1 (60 мас. %), имеет эксплуатационные характеристики, близкие к чистой бронзе;

– оптимальным по эксплуатационным характеристикам является материал с содержанием БрОФ10-1 – 40 мас. %, WC-Co – 60 мас. %.

Материал с содержанием компонентов БрОФ10-1 – 50 %, W-Co – 60 % имеет срок службы, превышающий аналог, и может рекомендоваться в качестве фрикционного композиционного покрытия на стальной основе в узлах трения технологического оборудования.

Список литературы

1 Способ получения покрытия из антифрикционного металлофторопластового порошкового материала : пат. ВУ № 18498 / Ю. Л. Бобарикин, А. Н. Швецов, С. В. Шишков. – Оpubл. 30.08.2014.

Научное издание

КОМПОЗИТЫ
В МАШИНОСТРОЕНИИ И ТРАНСПОРТЕ

Материалы Международной научно-практической конференции

Издается в авторской редакции

Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Корректор *Т. Л. Федькова*

Подписано в печать 30.12.2024 г. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Гарнитура Таймс. Уч.-изд. л. 6,54. Зак. № 494. Изд. № 52.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

№ 3/1583 от 14.11.2017.

Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель