

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

КОМПОЗИТЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ТРАНСПОРТЕ

Материалы II Международной научно-практической конференции
(Гомель, 24 апреля 2025 г.)

Под общей редакцией кандидата технических наук, доцента В. Л. МОИСЕЕНКО

Гомель 2025

УДК 620.22
ББК 30.3
К63

Редакционно-издательская группа:
*В. Л. Моисеенко (отв. редактор), В. А. Довгяло (зам. отв. редактора),
К. А. Саховский (отв. секретарь)*

*Редакционно-издательская группа не ставит задачей рецензирование
и редактирование представленных статей.
Ответственность за содержание статей лежит на авторах.*

Композиты в машиностроении и транспорте : материалы
К63 II Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 24 апреля 2025 г.) ; под
общ. ред. В. Л. Моисеенко / М-во трансп. и коммуникаций Респ.
Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2025. –
77 с. – Цифровое электр. изд. – Загл. с тит. экрана. – Электр. текст.
дан. – 1,53 Мб. – Систем. требования : Adobe Reader.
ISBN 978-985-891-238-3

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

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов и специалистов, занятых изучением и разработкой современных технологий композиционных материалов.

УДК 620.22

ISBN 978-985-891-238-3

© Оформление. БелГУТ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Бакланенко Л. Н., Дубодел В. П., Пантюхов О. Е., Шаповалов В. М.</i> Оценка возможности применения очищенной эмульсии для смазки пресс-форм при производстве ЖБИ.....	5
<i>Богданович П. Н., Коднянко М. Ю., Фоменко А. В.</i> Триботехнические характеристики эластомеров для футеровки приводного барабана ленточного конвейера ...	9
<i>Богданович П. Н., Коднянко М. Ю., Фоменко А. В.</i> Выбор материала для футеровки приводного барабана ленточного конвейера по износостойкости	12
<i>Брель Д. В., Скороход А. З.</i> Изучение морфологии и лиофобности материала на основе дисперсных частиц политетрафторэтилена.....	16
<i>Глушаков Р. А.</i> Материалы для стреловых конструкций железнодорожных кранов	18
<i>Джафаров В., Алимирзоева Н., Манафов М., Бекташи Н., Шаповалов В. М.</i> Полимерные композиты на основе полиолефинов и высокодисперсных природных минеральных наполнителей.....	22
<i>Ефимчик К. В., Кудина Е. Ф.</i> Комплекты элементов из материалов на основе геомодифицированных полиолефинов.....	25
<i>Кашиур Н. В.</i> Ременные передачи	28
<i>Киргинцева С. В., Можаровский В. В.</i> Определение скорости волны и максимального давления при гидроударе в однослойных и двухслойных трубах из композитов	30
<i>Коваленко М. А., Овчинников К. В., Шаповалов В. М.</i> Влияние конструкции оправок на структуру и свойства волокнисто-пористых изделий при их аэродинамическом формировании	34
<i>Костач Е. А.</i> Зубчатые передачи	37
<i>Крупский А. А.</i> Композиты в обеспечении безопасности транспорта	38

<i>Моисеенко В. Л., Титорович И. В., Кулинченко А. В., Еремич М. Ф. Влияние чистоты трущихся поверхностей на работу подшипников скольжения на основе природного композиционного материала</i>	40
<i>Моисеенко В. Л., Титорович И. В., Мороз И. А., Думаренок К. В. Использование природных композиционных материалов в узлах трения путевых машин.....</i>	43
<i>Моложавский В. А. Контактная шовная сварка: макроструктурный анализ образцов из стали 08Ю, полученных методом контактной шовой сварки</i>	48
<i>Остриков О. М. Слоистый нанодвойниковый композит.....</i>	55
<i>Петрусевич В. В., Томашов В. В. Апробация технологии профилактической обработки асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог составом гидрофобным профилактическим.....</i>	59
<i>Пинчук Н. А. Износостойкие материалы для рабочего оборудования бульдозера</i>	63
<i>Попов А. Н., Кривенков А. А. Электрофрикционное упрочнение землеобрабатывающего инструмента</i>	65
<i>Силенок Е. В. Применение комплексных материалов при разработке подъемников.....</i>	67
<i>Суторьма И. И. Кинетика плавления чистых металлов.....</i>	69
<i>Томашов В. В. Повторное использование вторичного сырья в качестве модифицирующих добавок в дорожном асфальтобетоне.....</i>	72

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОЧИЩЕННОЙ ЭМУЛЬСИИ ДЛЯ СМАЗКИ ПРЕСС-ФОРМ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖБИ

*Л. Н. БАКЛАНЕНКО¹, В. П. ДУБОДЕЛ¹,
О. Е. ПАНТЮХОВ², В. М. ШАПОВАЛОВ³*

*¹Мозырский государственный педагогический университет
им. П. И. Шамякина, Республика Беларусь*

*²Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

*³Институт механики металлополимерных систем
им. В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

Смазывание форм является обязательной технологической операцией при производстве железобетонных изделий, и поэтому на предприятиях сборного железобетона расходуется большое количество смазочных материалов. Выбор эффективных смазок для форм играет значительную роль в совершенствовании технологии производства ЖБИ. Особенно важны эффективные смазки для вертикальных стенок форм.

К смазкам для стальных форм в заводском производстве ЖБИ предъявляется ряд требований: повышенная адгезия к металлу и пониженная адгезия к бетону; возможность механизации и автоматизации процессов приготовления и нанесения смазки на поверхность форм; отсутствие потребности в очистке поверхности форм от остатков бетона; исключение возможности появления пятен и воздушных пор на поверхности изделий, прилегающих к форме; снижение прочности и плотности бетона в поверхностных слоях. Кроме этого, смазка должна обладать антикоррозионными и защитными свойствами, не содержать вредных для здоровья веществ, быть безопасной в пожарном отношении. Составляющие компоненты смазки не должны быть дорогостоящими и дефицитными. Основными требованиями к смазке на стадии ее нанесения являются хорошее

смазывание и прочное сцепление с поверхностью форм. На стадии второго периода необходимо, чтобы смазка по возможности имела минимальную адгезию к свежей бетонной смеси, а затем к поверхности затвердевшего бетона.

Для смазывания форм применяют различные масла и растворы нефтепродуктов, отходы химической и мыловаренной промышленности и др. Использование чистых масел повышает стоимость смазок. Некоторые масляные смазки, имеющие в своем составе керосин, являются пожароопасными и создают антисанитарные условия в цехах. В производстве ЖБИ используют чистые или отработанные масла: машинное, веретенное, трансформаторное и др. Такие смазки обеспечивают легкую распалубку изделий. Однако в связи с малой вязкостью они легко стекают с бортов формы и образуют масляные пятна на готовой продукции. Соляровое масло вредно влияет на организм человека, портит обувь и одежду. Пластичные смазки (солидол, консталин, НК-1–НК-13, НК-50 и др.) и твердые нефтепродукты (парафин, церезин и др.) требуют предварительного разогрева до 50–60 °С, что затрудняет их нанесение на формы. Они имеют высокую стоимость, а расход их велик.

Использование раствора мыла в виде отходов мыловаренной промышленности наряду с достоинством (легкое распалубливание, гладкая и чистая поверхность изделий) вызывает быстрое зарастание формы бетоном и коррозию форм, так как в составе смазки имеется поваренная соль. Попытки использовать для смазывания форм кремнийорганические соединения показали, что изделия распалубливаются без затруднений и имеют хорошую чистую поверхность, однако смазка получается нестабильной, и из-за дефицитности соединений она не нашла распространения.

С целью снижения стоимости традиционных смазок для форм разработана смазка, включающая нефтепродукт, кальцинированную соду и воду. В ней в качестве нефтепродукта использовали продукт электрокоагуляционной переработки отработанной масляной СОЖ (смазочно-охлаждающая жидкость), а компоненты смазки взяты в следующем соотношении, мас. %: продукт электрокоагуляционной переработки водомасляной эмульсии отработанной СОЖ (очищенная прямая водомасляная эмульсия) – 36–42, кальцинированная сода – 1–3, вода – остальное. С целью устранения жировых пятен

смазка дополнительно содержит гашеную известь в количестве 1–3 мас. %.

Разработанная смазочная композиция прошла испытания, в ходе которых оценивали стабильность смазки, ее адгезию к форме, а также состояние поверхности бетона и механические свойства изделий, полученных с применением смазки.

В таблице 1 приведены составы смазок, а в таблице 2 – результаты испытаний. Стабильность смазок на основе ЭКС (смазки 1 и 2) сравнительно низкая – до 1 суток, в то время как смазки на основе нефтепродукта (смазки 3–6 в таблице 2) сохраняют стабильность более 40 суток. Это, по-видимому, объясняется высокой эмульгирующей способностью кальциевых мыл, образующихся в результате взаимодействия каустической соды с кислотными группами окисленных молекул отработанного масла. Достоинством смазок 3–6 является также более низкая адгезия к металлической форме, что облегчает отделение формы от изделия. На поверхности бетона, полученного с использованием смазок 1 и 2, имеются мелкие поры, а также отдельные темные жировые пятна. При замене в смазке ЭКС на нефтепродукт (смазки 3–5) поры на поверхности изделия исчезают, но темные жировые пятна остаются. При введении в смазку на основе нефтепродукта гашеной извести (смазка 6) удается устранить жировые пятна. Поверхность изделия в данном случае получается гладкой и имеет светло-серый цвет.

Таблица 1 – Состав смазок, используемых в экспериментах (содержание компонентов в %)

Компоненты смазок	Номер смазки					
	1	2	3	4	5	6
ЭКС	10	25	–	–	–	–
Кальцинированная сода	0,75	1	0,5	1	2	2
Очищенная эмульсия	–	–	33	36	39	39
Гашеная известь	–	–	–	–	–	2
Вода техническая	89,25	74	66,5	63	59	57

Механические свойства железобетонных изделий оценивали по ГОСТ 8829-85, контролируя показатели прочности, жесткости и трещиностойкости, а также значение контрольных прогибов.

Жесткость конструкции оценивается по значению прогиба, измеренного при контрольной нагрузке.

Таблица 2 – Результаты испытаний

Свойства испытанных смазок	Номер смазки					
	1	2	3	4	5	6
Стабильность смазки, суток (ГОСТ 6243-52 раздел V)	1	0,8	45	46	50	56
Адгезия, кг/см ² (ТУ3810-15-36-75)	100	70	66	63	60	47
Характеристика смазки после ее получения	Однородная эмульсия					
Характеристика поверхности бетона	Мелкие поры, отдельные жировые темные пятна		Отдельные темные пятна, поры отсутствуют		Поверхность светло-серого цвета, гладкая без пор	
Прочность, кг	17737		17735		17735	
Жесткость: – контрольная нагрузка, кг – прогиб, мм	8050 2,8		8050 2,8		8050 2,8	
Трещиностойкость, кг	9050		9050		9050	

Из данных, приведенных в таблице 2, видно, что механические характеристики плит перекрытий не изменились при замене смазки на основе эмульсола на разработанную смазочную композицию.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛАСТОМЕРОВ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ПРИВОДНОГО БАРАБАНА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

П. Н. БОГДАНОВИЧ¹, М. Ю. КОДНЯНКО², А. В. ФОМЕНКО¹

*¹Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

*²Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с опытным
производством, Республика Беларусь*

Введение. Работоспособность ленточного конвейера определяется не только износостойкостью ε футеровочного покрытия приводного барабана. Не менее важной характеристикой является коэффициент сцепления β этого покрытия с конвейерной лентой, определяющий максимальное усилие, при котором происходит проскальзывание конвейерной ленты по футеровке барабана. Таким образом, β определяет грузоподъемность ленточного конвейера и долговечность обеих сопрягаемых деталей. Более высокие значения β характерны для резин. Поэтому представляло интерес изучить закономерности влияния нормальной нагрузки на линейную интенсивность изнашивания I_h и коэффициент трения покоя f эластомеров по полиуретану ПУ88.

Методика проведения испытаний. Испытания эластомеров на износостойкость проводились на машине трения СМТ-1 по схеме «покрытие ролика из исследуемого материала – покрытие ролика (контртело) из ПУ88». Внутренний диаметр стальных роликов составлял 30 мм, наружный – 30 мм, а высота – 10 мм. На наружную поверхность ролика клеевым способом наносился слой исследуемых материалов (резина марки ИРП-1347 и ШИ-50) толщиной 5 мм, а на контртело – такой же слой из ПУ88. Нижний ролик погружался в измельченную калийную руду, содержащую абразивные частицы, средний размер которых составлял ~60 мкм. Осуществлялось трение качения с проскальзыванием 10 %. Линейная скорость перемещения точек поверхности трения составляла 1,0 м/с. Интенсивность изнашивания определяли по потере массы покрытия роликов.

Продолжительность испытаний t равнялась 480 минутам. Определение коэффициента β осуществлялось по схеме жестко закрепленной на массивной плите пластины из эластомера – два неподвижных ролика, покрытые футеровочным материалом.

Обсуждение результатов испытаний. Испытания показали, что интенсивность изнашивания резин монотонно возрастает с увеличением давления (рисунок 1). Это объясняется ростом контактных деформаций поверхностного слоя резин, вызывающих их усталостное разрушение, а также увеличением глубины внедрения частиц горной породы, способствующим повышению абразивного изнашивания. Более износостойкой оказалась резина марки ШИ-50, прочность при разрыве σ_p которой выше, чем σ_p резины ИРП-1347 [1–3]. Однако сопротивление изнашиванию резин обеих марок в ~ 2 – 8 раз ниже износостойкости полиуретанов. Причина в том, что предел прочности при разрыве полиуретанов ориентировочно в 3 раза выше σ_p исследуемых резин, к тому же твердость резин по Шору не превышает 60 (шкала А).

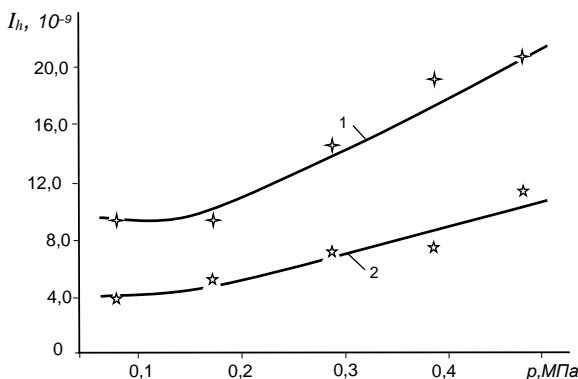


Рисунок 1 – Зависимости линейной интенсивности изнашивания резин от нагрузки:
1 – ИРП-1347; 2 – ШИ-50

Установлено, что для всех исследуемых материалов характерно монотонное возрастание f с повышением нормальной нагрузки. Такая зависимость $f(p)$ обусловлена влиянием следующих факторов. С повышением давления несколько увеличивается площадь фактического контакта сопрягаемых деталей, что сопровождается

ростом числа фрикционных связей и, как следствие, увеличением молекулярной составляющей коэффициента сопротивления качению. При этом возрастает также ширина контактной площадки, что приводит к увеличению относительного проскальзывания тел качения и повышению коэффициента f . Кроме того, с увеличением p существенно возрастают гистерезисные потери, что особенно характерно для эластомеров [2]. Таким образом, с ростом давления увеличиваются все три составляющие коэффициента покоя и β .

Анализ представленных на рисунке 2 кривых показывает, что при всех значениях контактного давления коэффициент трения покоя, а, следовательно, и β выше у сопряжения «полиуретан ПУ88 – резина ШИ-50» (кривая 1 на рисунке 2). Это, по-видимому, обусловлено низкой твердостью резины, благодаря чему она испытывает высокие гистерезисные потери, имеет большую площадь фактического контакта и высокое сопротивление проскальзыванию. Исходя из этой позиции можно объяснить тот факт, что кривая 2 зависимости $f(p)$, характерная для резины ИРП-1347, располагается ниже кривой 1.

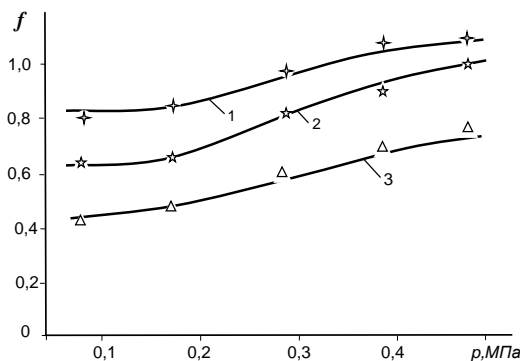


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента трения покоя эластомеров по ПУ88 от нагрузки:
1 – ШИ-50; 2 – ИРП-1347; 3 – ПУ88

Заключение. По триботехническим характеристикам резина ШИ-50 превосходит резину ИРП-1347. Полиуретаны обладают в ~2–8 раз более высокой износостойкостью по сравнению с резинами, однако уступают им по коэффициенту сцепления с контртелом.

Список литературы

1 **Богданович, П. Н.** Трение и износ в машинах : учеб. / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск : Выш. школа, 1999. – 374 с.

2 **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника : учеб. для техн. вузов / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1999. – 424 с.

3 **Богданович, П. Н.** Изнашивание сопряжения цилиндр – манжета бурового насоса в водной среде, содержащей абразив / П. Н. Богданович, М. Ю. Коднянко, В. М. Станкевич // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 1. – С. 101–107.

УДК 622.242.6-762:621.891(045)

ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ПРИВОДНОГО БАРАБАНА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПО ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

П. Н. БОГДАНОВИЧ¹, М. Ю. КОДНЯНКО², А. В. ФОМЕНКО¹

*¹Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

*²Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным
производством, Республика Беларусь*

Введение. Наиболее ответственной деталью ленточного конвейера, определяющей его производительность, является приводной барабан, работающий в режиме предварительного смещения. Сравнительно низкий (0,30–0,4) коэффициент сцепления стальной обечайки барабана с лентой из резины или полиуретана является причиной проскальзывания ленты и ограничивает массу транспортируемого груза. Поэтому в последние годы осуществляют рифление либо футеровку обечайки резиной или полиуретаном, что позволяет повысить коэффициент сцепления в 1,5–2 раза. При футеровке весьма важно знать триботехнические характеристики применяемых материалов. Цель настоящей работы сводилась к определению износостойкости полиуретанов различной твердости в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Методика проведения испытаний. Испытания проводились на машине трения СМТ-1 по схеме «покрытие стального ролика из исследуемого материала – покрытие ролика (контртело)». Внутренний

диаметр стальных роликов составлял 16 мм, наружный – 30 мм, а высота – 10 мм. На наружную поверхность ролика клеевым способом наносился слой одного из исследуемых материалов (ПУ68, ПУ78, ПУ88) толщиной 5 мм, а на контртело – такой же слой из ПУ88. Нижний ролик погружался в измельченную калийную руду, содержащую абразивные частицы, средний размер которых составлял ~60 мкм. Линейная скорость перемещения точек поверхности трения составляла 1,0 м/с. При этом реализовывался режим качения с проскальзыванием 10 %. Интенсивность изнашивания определяли по потере массы роликов. Площадь контакта определялась экспериментально методом отпечатка. Продолжительность испытаний t равнялась 480 минутам.

Обсуждение результатов испытаний. Анализ полученных результатов эксперимента свидетельствует о том, что зависимости интенсивности изнашивания I_h полиуретанов всех марок от нормальной нагрузки (номинального контактного давления p) графически изображаются кривыми с минимумом (рисунок 1). Наличие минимума, по-видимому, обусловлено конкурирующим влиянием двух факторов: с одной стороны, роста глубины внедрения абразивных частиц горной породы в поверхностный слой эластомера, а с другой – уменьшения вероятности проникновения абразивных частиц в зону контакта и формирования по этой причине меньшего числа повреждений (бороздок). Второй фактор в интервале малых нагрузок (0,05–0,25 МПа) оказывает доминирующее влияние на процесс изнашивания полиуретанов, что сопровождается снижением I_h .

О существенном вкладе абразивного изнашивания свидетельствует топография поверхности ПУ68 после трения качения при $p = 0,2$ МПа (рисунок 2). На это, в частности, указывают многочисленные короткие бороздки, ориентированные параллельно вектору скорости v перемещения абразивных частиц при проскальзывании. Изношенная поверхность полиуретана содержит также углубления (см. в направлении стрелки), образовавшиеся в результате возникновения микроразрывов, ориентированных перпендикулярно вектору скорости, и последующего усталостного разрушения, которое вызвано многократными циклическими деформациями поверхностного слоя эластомера [1, 2].

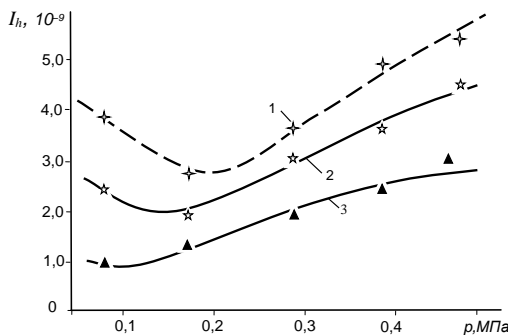


Рисунок 1 – Зависимости линейной интенсивности изнашивания полиуретана от нагрузки:
1 – ПУ68; 2 – ПУ78; 3 – ПУ88

После достижения минимума интенсивности изнашивания в области давлений 0,1–0,55 МПа зависимость $I_h(p)$ становится возрастающей. Можно полагать, что основная причина роста I_h заключается в том, что с повышением p увеличиваются амплитудные значения контактных деформаций полиуретана и глубина внедрения абразивных частиц, а равно и толщина интенсивно деформируемого рабочего слоя [1]. Это приводит к более существенному усталостному разрушению поверхности трения. Кроме того, увеличивается площадь фактического контакта и молекулярная составляющая трения и, как следствие, возрастает вклад адгезионного изнашивания полимера [2, 3].

Расположение кривых $I_h(p)$ относительно друг друга (см. рисунок 1) свидетельствует о том, что с повышением твердости полиуретана его износостойкость возрастает при всех значениях контактного давления. Одной из причин такой закономерности является глубина внедрения абразивных частиц и площадь поперечного сечения оставляемых ими бороздок. При повышении твердости изнашиваемого материала уменьшается объем интенсивно деформируемого слоя и доля вынужденно эластических деформаций. Для фрикционного контакта ПУ88 с контртелом характерна более низкая температура на пятнах касания и площадь фактического контакта сопрягаемых тел. В итоге снижается интенсивность не только абразивного, но и усталостного изнашивания, уменьшается также суммарный износ полиуретана.

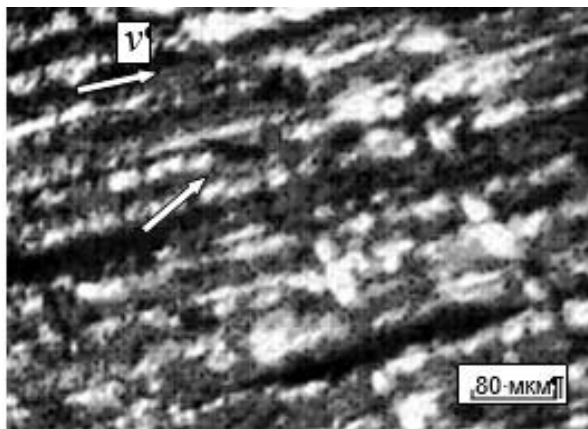


Рисунок 2 – Поверхность ПУ68 после изнашивания

Заключение. Интенсивность изнашивания полиуретана находится в корреляции с его твердостью. Благодаря высокой твердости и прочности критерию «износостойкость» в большей мере соответствует полиуретан марки ПУ88. Зависимость линейной интенсивности изнашивания полиуретанов от контактного давления графически изображается кривой с минимумом. Доминирующими видами изнашивания полиуретанов при трении в горной породе являются абразивное и усталостное.

Список литературы

- 1 **Богданович, П. Н.** Трение и износ в машинах : учеб. / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск : Выш. шк., 1999. – 374 с.
- 2 **Тененбаум, М. М.** Сопротивление абразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. – М. : Машиностроение, 1976. – 596 с.
- 3 **Мур, Д.** Трение и смазка эластомеров / Д. Мур. – М. : Химия, 1977. – 263 с.

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ И ЛИОФОБНОСТИ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Д. В. БРЕЛЬ¹, А. З. СКОРОХОД²

¹*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

²*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Введение. В ходе получения волокнисто-пористого материала «Грифтекс» по технологии газодинамической вытяжки расплава политетрафторэтилена (ПТФЭ) [1, 2] в вакуумной камере остается значительное количество полидисперсных частиц ПТФЭ, которые, являясь лиофобными, потенциально могут быть использованы для формирования покрытий с определенными свойствами.

Цель работы. Исследовать возможность получения лиофобного материала из продуктов газодинамической вытяжки ПТФЭ и оценить характеристики полученного материала.

Материалы и методы исследований. В качестве материала для нанесения пористого слоя использовали дисперсные (0,6–400 мкм) продукты газодинамической вытяжки расплава ПТФЭ, измельченные до однородной массы. В качестве подложки использовали сетчатую ткань из полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Роль связующего выполнял дисперсный (50–100 мкм) полиэтилен (ПЭ), предварительно нанесенный и припавленный к поверхности подложки, тем самым получая препрег. Дисперсные частицы ПТФЭ через сито посыпали на поверхность препрега, прикладывали постоянную нагрузку и вновь нагревали до температуры плавления ПЭ, таким образом закрепляя частицы ПТФЭ на подложке.

Леофобность полученного материала оценивали методом лежачей капли с использованием 3 тестовых жидкостей (вода, глицерин, 1-бромнафталин).

Морфологию поверхности изучали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) «VEGA II LSH» («Tescan Instruments Analytical», Чехия).

Результаты и их обсуждение. Анализ морфологии поверхности исследуемого покрытия свидетельствует о высокой степени развитости поверхности, равномерности и практически полном перекрытии ячейки ПЭТФ-подложки (рисунок 1). Установлено, что частицы ПТФЭ закрепляются в расплаве ПЭ.

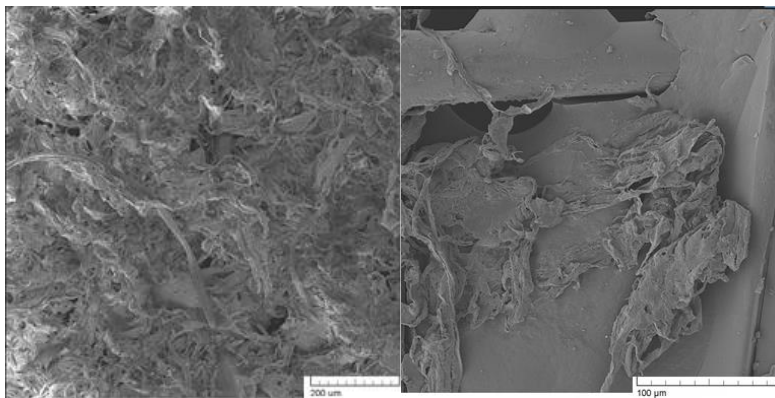


Рисунок 1 – Морфология поверхности материала на основе дисперсных частиц ПТФЭ

Анализ значений лиофобности показал, что материал обладает достаточно высокими отталкивающими свойствами по отношению ко всем трем тестовым жидкостям ($130,1^\circ$ – для капель воды, $120,5^\circ$ – для глицерина, $122,7^\circ$ – для 1-бромнафталина).

Вывод. В ходе исследований установлено, что разработанный материал на основе дисперсных частиц ПТФЭ обладает лиофобными свойствами, а также имеет развитую структуру на поверхности.

Список литературы

1 **Гракович, П. Н.** Фторопластовый волокнисто-пористый материал «Грифтекс» и фильтры «Гриф» / П. Н. Гракович, Л. Ф. Иванов, И. Л. Рябенко // Трансфер технологий в свободных экономических зонах. Тенденции. Теория и практика. Транстех 2002 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 15–17 мая 2002 г. – В 2 ч. Ч. 2. – С. 132–133.

2 Лазерная абляция политетрафторэтилена / П. Н. Гракович, Л. Ф. Иванов, Л. А. Калинин [и др.] // Российский химический журнал. – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 97–105.

УДК 624.19/.8:621.763

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СТРЕЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КРАНОВ

Р. А. ГЛУШАКОВ

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Введение

Железнодорожные краны представляют собой важную категорию подъемно-транспортных машин, предназначенных для выполнения погрузочно-разгрузочных и монтажных работ в пределах железнодорожной инфраструктуры. Одним из ключевых элементов конструкции является стрела, которая служит для передачи усилий от груза к основной несущей части крана и обеспечивает его рабочий радиус. Надежность и устойчивость стрелы напрямую зависят от применяемых материалов. В данной работе рассматриваются требования к материалам стреловых конструкций, их виды и современные тенденции в их применении.

Требования к материалам стреловых конструкций

Стрела крана испытывает значительные нагрузки, в том числе изгибающие, сжимающие и динамические. Кроме того, в процессе эксплуатации кран может работать в условиях низких температур, повышенной влажности и вибраций. Это накладывает следующие требования к материалам:

- 1 Высокая удельная прочность – способность выдерживать большие нагрузки при относительно малом весе.
- 2 Устойчивость к усталостным разрушениям (так как стрела подвергается многократным циклам нагружения и разгрузки).
- 3 Сварочная способность – возможность соединения отдельных элементов без ухудшения механических свойств.

4 Хорошие характеристики пластичности и вязкости (особенно при работе в северных климатических условиях).

5 Коррозионная стойкость (особенно важна при длительной эксплуатации на открытом воздухе).

Материал должен также обеспечивать долговечность и безопасность конструкции при соблюдении допустимых массогабаритных характеристик крана.

Основные материалы стреловых конструкций

1 Конструкционные низколегированные стали

Основным типом материалов, применяемых при производстве стреловых конструкций, являются низколегированные конструкционные стали. Они обеспечивают высокую прочность и пластичность при умеренной массе.

Сталь 09Г2С – самая распространенная марка, обладающая хорошими механическими свойствами, пластичностью, ударной вязкостью и отличной свариваемостью. Применяется при температурах до -70°C .

Сталь 10ХСНД – атмосферостойкая низколегированная сталь, устойчива к коррозии без дополнительного покрытия. Часто используется для стреловых секций, работающих в агрессивной среде.

Стали С345, С390, С440 – используются в соответствии с требованиями по расчетной нагрузке. Цифры обозначают предел прочности (в МПа).

2 Легированные и высокопрочные стали

Для снижения массы и увеличения грузоподъемности применяются высокопрочные стали.

Сталь 30ХГСА – легированная хромоникелемарганцевая сталь с высокой прочностью и хорошей сопротивляемостью усталостному разрушению. Используется в стреловых элементах кранов с повышенными нагрузками.

Сталь 40Х – применяется в усиленных элементах, подвергающихся динамическим нагрузкам, требует термообработки.

3 Перспективные материалы

Хотя в настоящее время стали остаются основным материалом для стреловых конструкций, развиваются и альтернативные направления.

Алюминиевые сплавы (АМг6, Д16Т) – значительно легче стали, но требуют более тщательного расчета прочности, уступая в усталостной стойкости.

Композиты (углепластики, стеклопластики) – перспективные материалы с высокой удельной прочностью, но пока ограничены в применении из-за стоимости и сложности производства.

Титановые сплавы – очень прочные и легкие, но дорогие и сложные в обработке. Их использование оправдано лишь в специализированной технике.

Современные тенденции и технологии

1 Повышение прочности при снижении массы

Для повышения эффективности кранов стремятся уменьшить массу стреловых конструкций без потери прочности. Для этого используются высокопрочные стали, а также разрабатываются гибридные конструкции, комбинирующие металл и композиты.

2 Использование компьютерного моделирования

Современные CAD/CAM-системы позволяют проводить точные расчеты, оптимизируя форму и толщину элементов стрелы под конкретные нагрузки. Это позволяет использовать материалы более рационально, снижая массу конструкции.

3 Защита от коррозии и усталости

Для увеличения срока службы стрел применяются антикоррозийные покрытия, термическая обработка и методы неразрушающего контроля, выявляющие микротрещины и усталостные повреждения на ранних стадиях.

Обзор и сравнение используемых материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Материал	Прочность, МПа	Плотность, г/см ³	Усталостная стойкость	Коррозионная стойкость	Применение
Углеродистая сталь (Ст3)	370–500	7,85	Средняя	Низкая	Широко используется
Низколегированная сталь (09Г2С)	490–590	7,85	Высокая	Средняя	Часто используется

Окончание таблицы 1

Материал	Прочность, МПа	Плотность, г/см ³	Усталостная стойкость	Коррозионная стойкость	Применение
Высокопрочная сталь (С355, S690QL)	700–900	7,85	Высокая	Средняя, высокая	Для тяжелых кранов
Алюминиевые сплавы	300–500	2,7	Средняя	Высокая	Легкие краны
Титановые сплавы (BT6)	900–1100	4,5	Очень высокая	Высокая	Редко, из-за цены
Композиты (углепластик)	До 1000	1,5–2	Очень высокая	Очень высокая	Перспективный материал

В данной таблице представлены различные материалы и их характеристики, по которым можно наблюдать, какие материалы лучше выдерживают высокие нагрузки и сопротивляются коррозии.

Также были разработаны различные конструкции стрел, такие как решетчатая стрела, стрела овоидного профиля и стрела коробчатого профиля. На повышение грузоподъемности и надежности стрел влияет не только выбранный материал, но и профиль стрелы. Все эти стрелы были разработаны в Компас3D, где они проходили проверку на прочность.

Заключение

Стреловая конструкция – один из ключевых элементов железнодорожного крана, от которого зависит его грузоподъемность, радиус действия и безопасность эксплуатации. Основными материалами для стрел остаются низколегированные и высокопрочные стали благодаря их отличным механическим свойствам и доступности. Однако современные требования к снижению массы и повышению ресурса стимулируют применение новых материалов и технологий, в том числе алюминиевых сплавов и композитов. В будущем выбор материалов будет все больше зависеть от цифровых расчетов, экономических факторов и требований к экологичности.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИОЛЕФИНОВ И ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

*В. ДЖАФАРОВ¹, Н. АЛИМИРЗОЕВА¹, М. МАНАФОВ¹,
Н. БЕКТАШИ¹, В. М. ШАПОВАЛОВ²*

*¹Институт полимерных материалов Министерства науки и
образования Азербайджанской Республики, г. Сумгаит*

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

Введение. Одним из приоритетных направлений современного материаловедения является физическое модифицирование различных полимеров, обеспечивающих получение новых композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами [1]. Использование твердых частиц различной формы и размерности и химической природы в качестве наполнителей в полимерных материалах открывает новые возможности для их модифицирования, поскольку высокая дисперсность частиц характеризуется адсорбционной активностью вследствие большой площади их поверхности и высокой поверхностной энергией [2]. При этом координирующую роль в получении композитов нового поколения с улучшенными эксплуатационными свойствами играют композиты с использованием высокодисперсных наполнителей, модифицированных различными функциональными добавками [3]. Следует отметить, что не все наполнители достаточно эффективны как с технической, так и с экономической точки зрения. В то же время в Азербайджане имеются обширные природные минеральные породы, которые могут успешно выступить в качестве наполнителей для полимерных материалов.

Методика исследований. В качестве наполнителей были выбраны природные минеральные породы и глины месторождений «Отходы горного дела», «Золотой Зод», «Плотина Демирчи», «Глина Товуз», «Турш Су». Исходные породы и глины были измельчены на мельнице и просеяны с использованием ситового метода до дисперсности 53 и

106 мкм соответственно. С целью улучшения совместимости полимерной матрицы с наполнителем и достижения более высоких свойств получаемого образца частицы наполнителей были аппретированы отдельными сополимерами, синтезированными в лабораторных условиях Сумгаитского института полимерных материалов [4]. В качестве полимерной матрицы использовали полиэтилен высокого давления (ПЭВД) или полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) и полипропилен (ПП), а также вторичный полиэтилен.

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных исследований получены значения предела прочности композитов на основе наполнителей различного состава. Их анализ свидетельствует о том, что наилучшие прочностные свойства получены для образцов с использованием в качестве наполнителя ПЭ-20 Везувиана-80 в количестве 20 мас. %. Другие наполнители при введении в полимер незначительно отличаются по своим показателям прочности. В то же время очевидно, что ряд аппретирующих добавок способствует улучшению прочности (на 11,7–33,5 %), что указывает на эффективное модифицирование поверхности частиц наполнителя аппретирующей добавкой, обеспечивающей улучшение адгезионной составляющей в системе «полимер – наполнитель». Наилучшие значения по прочности образца Везувиана-80 обусловлены, по-видимому, интенсивной кристаллизацией полиэтиленовой матрицы в процессе переработки в присутствии высокодисперсных частиц Везувиана-80 (53 мкм), что придает композиту повышенную структурную однородность.

При наполнении композитов на основе полипропилена прослеживается тенденция получения более высоких значений однородности композита и их прочности по сравнению с композитами на основе полиэтилена.

Согласно данным таблицы 1, прочность образцов находится в пределах 30,0 МПа и выше, а для образца с использованием вулканического пепла в количестве 30 мас. % и полипропиленовой матрицы 70 мас. % этот показатель составляет 38 МПа, принимая максимальное значение. Получение такого результата объясняется высокой степенью кристалличности и более подходящей стереорегулярной структурой полипропилена, а также высокой

дисперсностью и эффективным геометрическим соотношением частиц наполнителя.

Таблица 1 – Предел прочности при растяжении композитов на основе полипропилена

Наполнитель, %	Матрица, %	Предел прочности на растяжение σ , МПа
Отх. горн.пром.-40	ПП-60	33,6
«ГызылЗод»-30	ПП-70	30,6
«Дамирчи Дам»-50	ПП-50	32,3
Вулканичес.пепел-30	ПП-70	38

Среди композитов, полученных с использованием вторичного полиэтилена (таблица 2), лучшими прочностными свойствами обладает композит на основе α -кварц-70 и товузской глины, модифицированной полиметакрилатом, предел прочности при растяжении которых составляет 31 и 18,8 МПа соответственно.

Таблица 2 – Предел прочности при растяжении композитов на основе вторичного полиэтилена

Наполнитель, %	Матрица, %	Аппрет, %	Предел прочности на растяжение σ , МПа
Дашкесанская руда-70	ВПЭ-30	(Гекс.1+Акр.кис.)-2/1	16,7
Бентонит-60	ВПЭ-40	(МА+Геп.1)-1/1	15,8
α -кварц-70	ВПЭ-30	–	31
Тавузская глина-60	ВПЭ-40	Полиметакрилат-3	18,8

Закключение. Таким образом в результате сравнительного исследования прочности композитов на основе различных наполнителей Азербайджанского региона и функциональных добавок установлено, что практически все наполнители пригодны для физического модифицирования полиолефинов. Особым условием их применения является обязательное измельчение исходных пород наполнителей до высокодисперсного состояния, находящегося в пределах 50–100 мкм. Это подтверждается показателями прочности при растяжении образцов ПЭ-20 с Везувиана-80 и ПП с

вулканическим чешским пеплом, где наполнитель использовался без аппретирования. Наиболее эффективным наполнением полимеров является 20–30 мас. %. При этом при большем его содержании в композите (более 40 мас. %) увеличивается влияние его аппретирования на прочность образцов, что обусловлено улучшением адгезионного взаимодействия в системе «полимер – наполнитель». Аналогичные процессы наблюдаются и для композитов на основе вторичного полиэтилена.

Список литературы

- 1 Михайлин, Ю. А. Полимерные нанокomпозиционные материалы / Ю. А. Михайлин // Полимерные материалы. – 2009. – № 7. – С. 10–13.
- 2 Əlimirzəyeva, N. Ə. İzotaktik polipropilen və metal tərkibli nanodoldurucular əsasında termoplastik elastomer kompozitlərin alınması və tədqiqi / N. Ə. Əlimirzəyeva // Kimya üzrə fəlsəfə doktorluğu Dissertasiyası. – Sumqayıt, 2021. – S. 24
- 3 Alimirzayeva, N. A. The Effect of Metal-Containing Nanoparticles on the Thermo-Oxidative Properties of Thermoplastics Elastomers Based on Isotactic Polypropylene and Ethylene Propylene Diene Rubber / N. A. Alimirzayeva // New Materials, Compounds and Applications. – 2022. – Vol. 6, № 3. – P. 220–229.
- 4 Production of New Generation Composite Materials Based on High-Density Polyethylene and "Artesian Clay" and the Effect of Appret / V. J. Jafarov, N. A. Alimirzayeva, G. H. Musaeva [et al.] // Sumqayıt Dövlət Universiteti. Elmi Xəbərlər. Təbiət və texniki elmlər bölməsi, Cild 24. – 2024. – № 3. – S. 31–36.

УДК 624.19/.8:621.763

КОМПЛЕКТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЕОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ

К. В. ЕФИМЧИК, Е. Ф. КУДИНА

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

В развитии промышленного производства в настоящее время важно усовершенствование характеристик материалов. Особое внимание уделяется полимерным композиционным материалам (ПКМ). Из таких материалов получают детали с особыми свойствами и высокими эксплуатационными характеристиками. При получении

изделий из ПКМ нужно учитывать их будущие высокие прочностные свойства с одной стороны, а также специфику и экологическую безопасность их переработки и утилизации – с другой [1].

Перед научным сообществом стоит задача не только разработки экономически выгодного и экологически безопасного материала, но и поиска сфер его применения.

В настоящее время нами разработан композиционный материал на основе геомодифицированных полиолефинов, характеристики которого позволяют применять его в изготовлении изделий для быстровозводимых конструкций [2].

Разработанный материал подходит для изготовления сборно-разборного дорожного настила (СРДН), устанавливаемого на любую поверхность и собираемого с помощью замков в любую конфигурацию без использования специальной грузоподъемной техники [3].

С применением данного СРДН (рисунок 1) возможно укладывать не только ровную колею, но и места разъезда техники, площадки для хранения техники, выполнять плавные повороты, укладывать пешеходные дорожки, а также настилы для оборудования палаточных лагерей в полевых условиях (рисунок 2).

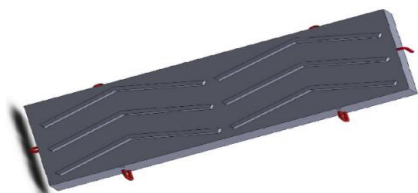


Рисунок 1 – Сборно-разборный дорожный настил



Рисунок 2 – Варианты укладки сборно-разборного дорожного настила

Также разработанный материал подходит для изготовления из него блоков (рисунок 3) для строительства временных быстровозводимых сооружений (зданий, складов и хранилищ) и оснащения их мебелью (столами, лавками, стеллажами и т. д.) в полевых условиях (рисунок 4).



Рисунок 3 – Блоки для строительства временных быстровозводимых сооружений:
а – вид сверху; б – вид сбоку

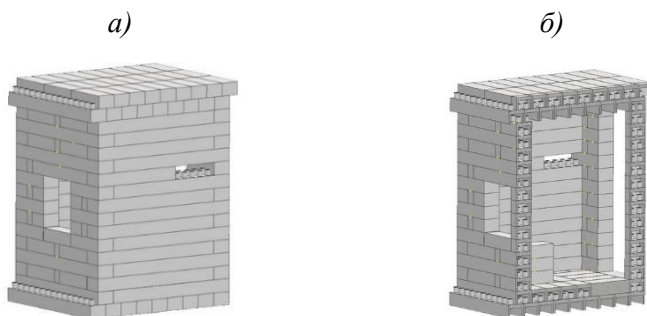


Рисунок 4 – Быстровозводимое сооружение из блоков:
а – вид слева; б – вид в разрезе

По сравнению с конструкциями из древесины, конструкции из композиционных материалов на основе геомодифицированных полиолефинов менее подвержены вредному воздействию окружающей среды, не требуют дополнительного обслуживания, а по сравнению с конструкциями из бетона имеют более легкий вес. Все это в совокупности снижает затраты на транспортировку и установку

конструкций, сокращает сроки строительства, повышает эксплуатационную надежность.

Список литературы

1 Кудина, Е. Ф. Методы утилизации и рециклинга полимерных композиционных материалов / Е. Ф. Кудина, К. В. Ефимчик // Полимерные материалы и технологии. – 2022. – Т. 8, № 4. – С. 77–86. – doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-4-77-86.

2 Патент ВУ 24427. Композиционный песчано-полимерный материал конструкционного назначения : № a20220175 : заявлено 30.06.2022 : опубл. 01.11.2024 / К. В. Ефимчик, А. А. Поддубный, Е. Ф. Кудина, Р. Ю. Доломанюк ; заявитель и патентообладатель Белорусский государственный университет транспорта.

3 Сборно-разборный дорожный настил : № a20230136 : заявлено 30.06.2022 / К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина, А. А. Поддубный ; заявитель и патентообладатель Белорусский государственный университет транспорта.

УДК 621.01

РЕМЕННЫЕ ПЕРЕДАЧИ

Н. В. КАШПУР

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Передача механической энергии, осуществляемая гибкой связью за счет трения между ремнем и шкивом, называется ременной. Ременная передача состоит из ведущего и ведомого шкивов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга и огибаемых приводным ремнем. Чем больше напряжение, угол обхвата шкива ремнем и коэффициент трения, тем больше передаваемая нагрузка. В зависимости от формы поперечного сечения ремня передачи бывают плоскоременные, клиноременные и круглоременные. Наибольшее распространение в машиностроении получили плоские и клиновидные ремни.

Клиновидные ремни благодаря клиновому воздействию со шкивами характеризуются повышенной тяговой способностью.

К достоинствам ременных передач относятся возможность передачи вращательного движения на большие расстояния (до 15 м);

простота конструкции и малая стоимость; плавность хода и безударность работы; легкость ухода и обслуживания.

Однако ременные передачи громоздки, недолговечны в быстроходных механизмах, не позволяют получать постоянного передаточного отношения из-за проскальзывания ремня, создают повышенные нагрузки на валы и опоры (подшипники), так как суммарное натяжение ветвей ремня значительно больше окружной силы передачи. Кроме того, во время эксплуатации ременной передачи не исключена возможность соскакивания и обрыва ремня, поэтому эти передачи нуждаются в постоянном надзоре.

В клиноременной передаче гибкая связь осуществляется приводным ремнем трапецевидного сечения с углом профиля, равным 40° (в недеформированном состоянии). По сравнению с плоским ремнем клиновидный ремень передает большие тяговые усилия, но передача с таким ремнем имеет пониженный КПД.

Клиноременные передачи целесообразно использовать при больших передаточных отношениях, малых межосевых расстояниях и вертикальном расположении осей валов. Скорость ремней клиноременной передачи не должна превышать 30 м/с. В противном случае клиновидные ремни будут вибрировать.

Клиновидные ремни для приводов общего назначения стандартизированы ГОСТ 1284.1-89.

При монтаже клиноременной передачи особое внимание обращают на правильность III установки клиновидного ремня в канавке обода шкива.

Клиновидные ремни бывают двух типов: кордтканевые и кордшнуровые. В кордтканевых ремнях корд выполнен в виде нескольких слоев кордткани с основой в виде крученых шнуров толщиной 0,8–0,9 мм.

В кордшнуровых ремнях корд состоит из одного слоя кордшнура, намотанного по винтовой линии и заключенного в тонкий слой резины для уменьшения трения.

Эти ремни используются в быстроходных передачах и являются гибкими, надежными и долговечными.

В последние годы в отечественном машиностроении все больше стали применять зубчатые (полиамидные) ремни. Эти ремни сочетают в своей конструкции все преимущества плоских ремней и зубчатых зацеплений.

На рабочей поверхности ремней имеются выступы, которые входят в зацепление с выступами на шкивах. Полиамидные ремни пригодны для высокоскоростных передач, а также для передач с небольшим межосевым расстоянием. Они допускают значительные перегрузки, очень надежны и прочны.

Достоинства клиновых передач по сравнению с плоскоременными: клиновая передача может передавать большую мощность, допускает меньший угол обхвата на малом шкиве, а следовательно, и меньшее межосевое расстояние, допускающее бесступенчатую регулировку скорости.

Недостатки: большие напряжения изгиба.

УДК 539.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВОЛНЫ И МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ГИДРОУДАРЕ В ОДНОСЛОЙНЫХ И ДВУХСЛОЙНЫХ ТРУБАХ ИЗ КОМПОЗИТОВ

С. В. КИРГИНЦЕВА, В. В. МОЖАРОВСКИЙ

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

При применении бестраншейных методов восстановления трубопроводов необходимо создавать автоматизированные методики расчета прочности, диагностики и оптимального подбора композитных материалов для восстанавливающих трубопроводов. Одним из таких методов является футеровка заглубленного трубопровода. В результате получается новая труба внутри изношенной трубы. На рисунке 1 показаны модели однослойной и двухслойной труб. Целью данной работы являются определение максимального давления и скорости волны при гидроударе для однослойных и двухслойных труб, а также решение задачи компьютерной реализации расчета вышеуказанных параметров для труб из различных материалов.

С помощью формул, предложенных российским ученым

Н. Е. Жуковским, можно легко определять предельно возможное значение напора при гидравлическом ударе (прямой удар) [1]:

$$\Delta P = \pm \rho C v_0 \text{ или } \Delta H = \pm C v_0 / g ,$$

где ΔP – ударное повышение давления; ρ – плотность перекачиваемой жидкости; C – скорость ударной волны; $g = 9,82 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; H – пьезометрический напор; $v_0 = 4Q / (\pi D^2)$ – скорость жидкости в трубе; Q – расход жидкости; D – внутренний диаметр трубы.

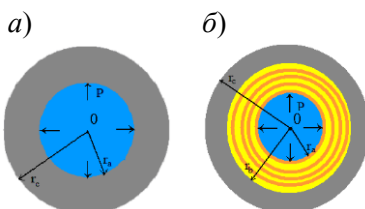


Рисунок 1 – Модели однослойной трубы (а) и двухслойной изотропной трубы с ортотропной футеровкой (б)

Максимальное давление, возникающее в трубе, можно определять также по программе в Excel [2]:

$$H_{\max} = H_0 + Dh_{\text{hammer}} + Dh_{\text{friction}} ,$$

где $Dh_{\text{hammer}} = \frac{C v_1}{g}$; $Dh_{\text{friction}} = I \frac{L v_1^2}{2 D g}$; I – коэффициент трения трубы; v_1

– средняя скорость жидкости в трубе, $v_1 = Q / A$; H_0 – значение напора, м вод. ст.; A – площадь поперечного сечения трубы.

В работе [3] выведены формулы, определяющие скорость волны при гидроударе для различных комбинаций слоистых упругих ортотропных свойств трубы и футеровки. Скорость волны определяется по формуле

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho(1 + K\Omega)}},$$

где $\Omega = \frac{2}{E} \left(\nu - \frac{1 + (r_c / r_a)^2}{1 - (r_c / r_a)^2} \right)$ – для изотропной трубы, r_c и r_a – внешний и внутренний радиусы трубы соответственно; E и ν – характеристики изотропной трубы; для изотропной трубы с ортотропной футеровкой

$$\Omega = \frac{2}{\alpha} \left[-1 + \frac{(r_a / r_b)^{-2k_1} (1 - (\beta / \alpha)) \left(\alpha (1 - (r_c / r_b)^{-2} g / \gamma) - g (1 - (r_c / r_b)^{-2}) \right)}{\beta (1 - (r_a / r_b)^{-2k_1}) \left(1 - (r_c / r_b)^{-2} g / \gamma \right) - g (1 - (r_c / r_b)^{-2}) (1 - (r_a / r_b)^{-2k_1} \beta / \alpha)} \right],$$

$$\beta = A_{12}^{(1)} - k_1 A_{11}^{(1)}, \alpha = A_{11}^{(1)} k_1 + A_{12}^{(1)}, \gamma = \frac{E}{1 - \nu}, g = -\frac{E}{1 + \nu}.$$

E и ν – характеристики изотропной трубы, k_1 – коэффициент для покрытия, $k = \sqrt{A_{22} / A_{11}}$,

$$A_{11} = \frac{E_r}{1 - \nu_{r\theta} \nu_{\theta r}}; A_{12} = \nu_{r\theta} \frac{E_\theta}{1 - \nu_{r\theta} \nu_{\theta r}}; A_{22} = \frac{E_\theta}{1 - \nu_{r\theta} \nu_{\theta r}}.$$

Механические свойства (модули упругости материала трубы E_θ , E_r и коэффициенты Пуассона $\nu_{\theta r}$, $\nu_{r\theta}$) представлены в цилиндрической системе координат $\theta r z$ и определяются по правилу «смесей» с объемным содержанием V волокна (индекс f) в матрице (индекс m) волокнистых материалов при расположении волокон (перпендикулярно, параллельно, радиально) [2].

Пример. По разработанной методике составлена программа расчета в среде Delphi на основе метода характеристик [4]. Рассмотрен расчет изотропной трубы из полиэтилена ($E = 1,43$ ГПа, $\nu = 0,4$) с радиусами $r_a = 0,13$ м, $r_c = 0,15$ м. Труба длиной $L = 2500$ м была разделена на 5 секций; задаются условия $H_0 = 49,95$ м; $Q_0 = 0,1$ м³/с; коэффициент трения $f = 0,018$; $T_{\max} = 50$ с; время закрытия задвижки $t_c = 0$ с; константа s , характеризующая быстроту закрытия

клапана, принята равной 0. Скорость волны по указанной методике $C = 303,4$ м/с. Значения максимального напора H_{\max} даны в таблице 1. Влияние ортотропного покрытия из стекловолокна ($E_f = 86$ ГПа, $\nu_f = 0,22$, $E_m = 3,76$ ГПа, $\nu_m = 0,374$, толщина $h_{\text{пок}} = 0,5$ см) с различным расположением и содержанием волокон V в матрице композита в трубе на максимальный напор H_{\max} и скорость волны C показаны на рисунке 2 и в таблице 1.

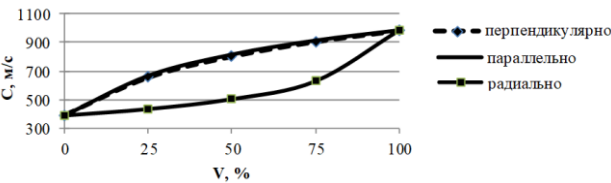


Рисунок 2 – Графики зависимости расположения и содержания волокон V в матрице композиционного материала покрытия от скорости волны C

Таблица 1 – Изменение максимального напора H_{\max}

$H_{\max}, \text{ М}$	Одно- слойная труба	Двухслойная труба					
		$V, \%$	0	25	50	75	100
H_{\max} (формула Жуковского)	108	Перпендикулярно	131	186	217	238	254
		Параллельно		189	219	239	
		Радиально		141	155	181	
H_{\max} (по программе Excel)	140	Перпендикулярно	169	224	255	276	292
		Параллельно		227	257	278	
		Радиально		179	193	219	
H_{\max} (по методу характеристик)	102	Перпендикулярно	124	178	209	230	247
		Параллельно		181	212	232	
		Радиально		133	147	173	

Эти результаты показывают методику расчета максимального напора.

Список литературы

1 Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – М. ; Л. : Гостехтеоретиздат, 1949. – 104 с.

2 Можаровский, В. В. Влияние схем армирования трубы из композита на скорость волны при гидравлическом ударе / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56). – С. 21–25.

3 Можаровский, В. В. Скорость волны при гидроударе и напряженно-деформированное состояние слоистых футерованных труб из ортотропных материалов / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 44–51.

4 Можаровский, В. В. Влияние расположения волокон в трубе из композита на параметры гидравлического удара / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 30–35.

УДК 66:665.693

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОПРАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИХ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ФОРМИРОВАНИИ

М. А. КОВАЛЕНКО, К. В. ОВЧИННИКОВ, В. М. ШАПОВАЛОВ

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

Для изготовления длинномерных трубных волокнисто-пористых изделий (ВПИ) в виде фильтров, аэраторов, носителей микроорганизмов необходимо использование вращающихся технологических подложек, так называемых оправок. В процессе изготовления ВПИ используют оправки монолитные и разборные. Система, состоящая из нескольких частей, имеет определенное преимущество – позволяет производить извлечение оправки из тела ВПИ, не прилагая больших усилий, связанных со значительной площадью трения тела ВПИ о корпус оправки. Процесс трения может негативно сказаться на качестве ВПИ и способствовать увеличению количества брака. Поэтому использование в производстве длинномерных ВПИ, оправок из двух частей, несмотря на дополнительную сложность их изготовления, представляется более

эффективным.

В то же время на лабораторно-технологическом участке ИММС НАН Беларуси в процессе применения разборных оправок при производстве аэраторов из полиэтилена высокого давления был выявлен недостаток, на прямую влияющий на качество конечных изделий и заключающийся в снижении плотности (увеличении продуваемости) аэратора в центре изделия с характерной шириной участка аэратора в пределах 15 см. При эксплуатации таких аэраторов, учитывая высокое сопротивление его остальных участков, значительное количество воздуха будет проходить через небольшой участок по центру изделия, что будет способствовать увеличению пузырьков воздуха и уменьшению эффективной зоны аэрации. Необходимо отметить, что условия нанесения волокон при производстве не меняются и не зависят от конкретного места оправки. В связи с этим для понимания создаваемой проблемы были проведены исследования по распределению величины перепада давления по длине готового изделия (рисунок 1). В результате были определены две вероятные причины появления данного эффекта. Механический фактор путем использования изношенных оправок, создающих биение с максимумом амплитуды в центре изделия, что приводит к «отталкиванию» ролика от оправки во время ее вращения. Подобный эффект встречался и у оправок с очень малыми амплитудами биения, что указывает на маловероятную причину появления данного эффекта.

Наиболее вероятным физическим фактором минимизации эффективной зоны аэрации представляется влияние массивного металлического соединительного конусного узла на процесс формирования пневмоэкструзионного изделия, что обусловлено следующими определениями. Тело оправки выполнено из металла толщиной 2 мм, а ее объем заполнен воздухом с формированием в центре соединительного узла в ВПИ. Таким образом формируется по центру изделия область с повышенной теплопроводностью (сильным теплоотводом) и массой, обладающей высокой общей теплоемкостью. Волокно, осаждаясь на поверхность оправки, охлаждается равномерно по всей длине, отдавая температуру металлическому телу оправки. В то же время по центру оправки вследствие своей «массивности» происходит более интенсивный и длительный отбор тепла у волокнистой структуры материала, приводящий к ее остыванию. Следовательно, при наборе определенной толщины телом

ВПИ в центре присутствует область, содержащая волокна с температурой ниже, чем у волокон на остальных частях оправки. В процессе прижимания роликом материала, волокна с более низкой температурой хуже поддаются сжатию, в результате чего волокна на данных участках изделия остаются без оптимального спрессовывания. Таким образом, неполная реализация прикатывающим устройством повышения плотности ВПИ формирует места с повышенной пористостью в условиях полноценной деформации ВП массы роликом практически по всей глубине.

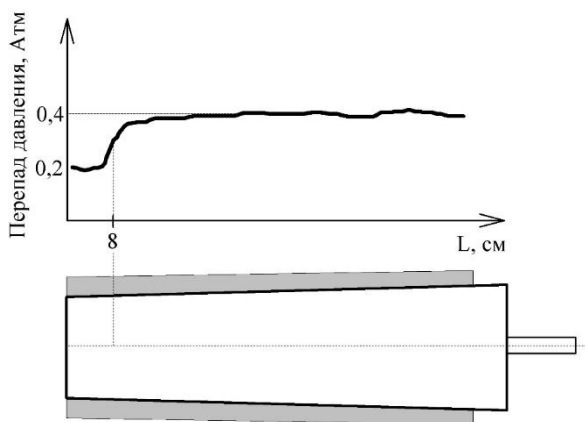


Рисунок 1 – Распределение величины показателей перепада давления по длине оправки

Измерение температуры проводилось при помощи тепловизора ADA TemPro VISION.

ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ

Е. А. КОСТАЧ

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Зубчатая передача – это механизм, принцип работы которого заключается в передаче мощности методом вращения. Продукт получил широкое распространение в самых разных сферах производства, что связано с его сравнительно простым и надежным устройством, доступностью обслуживания (смазывания), низкой затратой энергии в процессе работы.

Крутящий момент и эффективность продукта зависят от совокупности факторов, в числе которых следующие:

- габариты системы;
- размер и характеристика зубьев;
- материал изготовления;
- точность и прочие.

Если рассматривать основные сферы применения такого продукта, то это все промышленные направления. Зубчатые передачи незаменимы в буровых установках, двигателях внутреннего сгорания, в заводских станках и конвейерах, в точных приборах и прочих агрегатах. Принцип передачи усилия методом вращения шестеренок лежит и в брендовых аксессуарах, в частности в наручных часах. Однако есть нюанс: в этом случае работа зубчатой передачи не требует электрического привода.

Выбирая такой продукт для решения конкретных задач, следует быть внимательным, так как от его характеристики и специфики будут зависеть плавность хода, скорость вращательного момента, плавность работы системы и другие эксплуатационные особенности.

Важным достоинством зубчатой передачи является простота ее конструкции. Предмет не содержит множественных и сложных деталей, и, соответственно, ломаться в нем практически нечему. Это обеспечивает хороший срок его эксплуатации в любых условиях.

При более тщательном разборе конструктивной части зубчатой

передачи замечаем любопытные детали. В частности, на задний план уходит восприятие этого элемента как стандартного колеса с зазубренной внешней гранью. На самом деле даже при минимальном количестве составляющих у строения зубчатой передачи есть свои нюансы.

Наличие корпуса. Фрагмент присутствует не во всех моделях, но в большинстве из них. Корпус выполняет сразу несколько важных задач, к примеру прочно фиксирует все части системы и обеспечивает правильный расход смазочных материалов. Последние в таком случае защищены от вытекания и напрасной растраты, а значит гарантирован еще и экономный расход смазочных материалов в процессе функционирования системы. Примечательно то, что единых качественных характеристик корпуса нет: он может быть разного размера и формы и подбирается с учетом того, какая задача возлагается на инструмент.

УДК 625.096

КОМПОЗИТЫ В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТА

А. А. КРУПСКИЙ

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Введение. Композитные материалы, состоящие из двух или более компонентов с различными физическими и химическими свойствами, находят все более широкое применение в различных отраслях, включая транспорт. Их уникальные характеристики, такие как высокая прочность при низком весе, коррозионная стойкость и возможность адаптации к специфическим требованиям, делают композиты идеальными для использования в автомобилях, самолетах, поездах и других транспортных средствах. В данном реферате рассматриваются основные преимущества композитов и их роль в обеспечении безопасности транспорта.

Преимущества композитов. Легкость и прочность: композитные

материалы обладают высокой прочностью при низком весе. Это позволяет снизить общий вес транспортных средств, что, в свою очередь, улучшает топливную эффективность и маневренность [1].

Устойчивость к коррозии: композиты не подвержены коррозии, что увеличивает срок службы транспортных средств и снижает затраты на обслуживание.

Энергопоглощение: при авариях композитные материалы способны эффективно поглощать энергию удара, что снижает риск травм для пассажиров.

Гибкость в дизайне: композиты позволяют создавать сложные формы и конструкции, что открывает новые возможности для проектирования безопасных и аэродинамичных транспортных средств.

Применение композитов в транспорте. Автомобили: в современных автомобилях композитные материалы используются для изготовления кузовов, внутренних панелей и элементов безопасности (например, бамперов). Это позволяет улучшить защиту пассажиров при столкновениях [2].

Авиастроение: в авиации композиты применяются для создания фюзеляжей и крыльев самолетов. Они помогают снизить вес самолета и увеличить его топливную эффективность, а также обеспечивают высокую прочность на больших высотах.

Железнодорожный транспорт: в поездах композитные материалы используются для создания легких вагонов с высокой устойчивостью к механическим повреждениям. Это повышает безопасность пассажиров и снижает риск аварий.

Морской транспорт: в судостроении композиты применяются для создания корпусов судов, что обеспечивает их легкость и устойчивость к воздействию морской воды.

Заключение. Композитные материалы играют важную роль в обеспечении безопасности транспорта благодаря своим уникальным свойствам. Их использование позволяет создавать более легкие, прочные и долговечные транспортные средства, которые способны эффективно защищать пассажиров в случае аварий. С учетом постоянного развития технологий производства композитов можно ожидать дальнейшего расширения их применения в различных областях транспорта, что будет способствовать повышению уровня безопасности на дорогах, в воздухе и на воде.

Список литературы

1 Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учебное пособие / М. Л. Кербер ; под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2018. – 624 с.

2 Головкин, Г. С. Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов : монография / Г. С. Головкин, В. П. Дмитриенко. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 471 с.

УДК 66:665.693

ВЛИЯНИЕ ЧИСТОТЫ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА РАБОТУ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

*В. Л. МОИСЕЕНКО, И. В. ТИТОРОВИЧ,
А. В. КУЛИНЧЕНКО, М. Ф. ЕРЕМИЧ*

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Чем меньше чистота (шероховатость) трущихся поверхностей, тем меньше трение и износ их [1, 2]. Однако стоимость изготовления деталей с высокой чистотой обработки поверхности значительно выше, чем при низкой чистоте. В каждом конкретном случае шероховатость поверхности деталей должна быть выбрана в соответствии с назначением этих деталей и обоснована. Твердость поверхности также влияет на стоимость изготовления и износ.

Представляется целесообразным определить необходимую чистоту и твердость поверхности для стабильной работы подшипников скольжения.

Для исследований использовали ролики из стали 45, закаленной до твердости HRC 45–50 ед. и с шероховатостью поверхности $R_a = 2,5 \dots 0,32$ мкм, и из стали 45, незакаленной с $R_a = 2,5 \dots 0,63$ мкм. Испытания проводились при скорости скольжения $v = 0,25$ м/с.

Установлено, что у роликов с незакаленной поверхностью коэффициент трения нестабилен (рисунок 1). Температура в зоне трения больше по сравнению с закаленными роликами при одинаковой нагрузке. Так, при $p = 3,5$ МПа у роликов с

$R_a = 2,5 \dots 0,32$ мкм температура в зоне трения 57 и 72 °С соответственно для закаленных и незакаленных роликов, при $p = 5,5$ МПа – соответственно 90 и 110 °С.

Нагрузочная способность у незакаленных меньше и равна при температуре в зоне трения $T = 110$ °С составляет 5,5 МПа, а у закаленных – 7 МПа при такой же температуре. Коэффициент трения ниже у закаленных роликов при максимальной нагрузке. Неравномерность коэффициента трения объясняется интенсивным износом как прессованной модифицированной древесины, так и контртела.

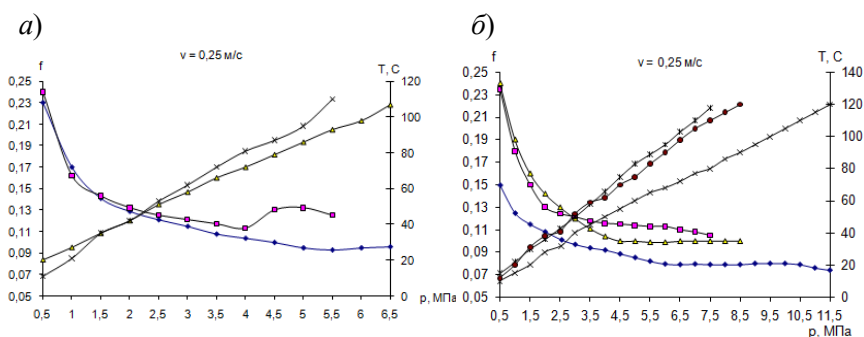
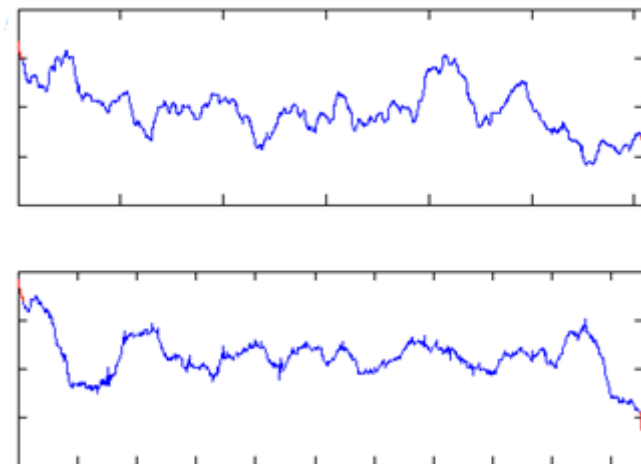


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения и температуры от давления СПС стального незакаленного (а) и закаленного (б) валов при различных шероховатостях его контактной поверхности:

1 – $R_a = 2,5 \dots 1,25$ мкм, 2 – $R_a = 1,25 \dots 0,63$ мкм, 3 – $R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм;

Определено, что в процессе работы шероховатость поверхности у незакаленных роликов (рисунок 2, а) ухудшается, т. е. микронеровности не сглаживаются. У закаленных роликов наблюдается обратная картина (рисунок 2, б). Микронеровности сглаживаются, шероховатость поверхности улучшается.

а)



б)

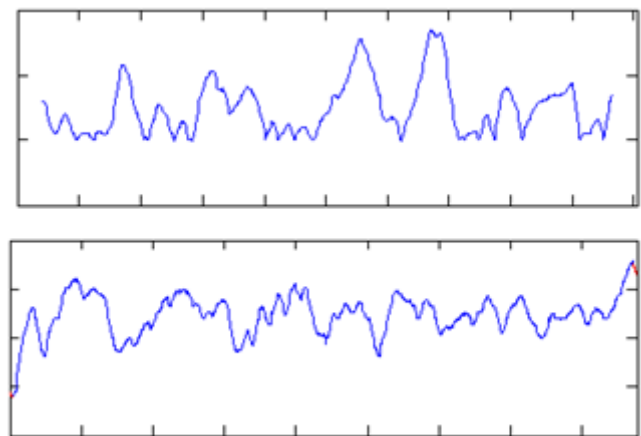


Рисунок 2 – Профилограммы поверхности трения роликов
а – закаленный ролик; б – незакаленный ролик

Установлено, что коэффициент трения у роликов с $R_a = 2,5 \dots 1,25$ мкм выше, чем у роликов с $R_a = 1,25 \dots 0,63$ мкм как у закаленных, так и у незакаленных, и составляет соответственно для закаленных $f = 0,108$ и $0,1$, для незакаленных $f = 0,125$ и $0,1$ при

температуре в зоне трения $T = 110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Следовательно, можно сделать вывод, что триботехнические свойства СПС повышаются как при улучшении шероховатости поверхности, так и при увеличении ее твердости.

Список литературы

1 Врублевская, В. И. Детали машин и основы конструирования : учебное пособие по курсовому проектированию для студентов механических специальностей вузов железнодорожного транспорта. В 3 ч. Ч. 3 / В. И. Врублевская. – Гомель : БелИИЖТ, 1991.

2 Перспективные технологические процессы обработки и упрочнения деталей машин : тезисы доклада / В. Н. Чачин, И. Л. Баршай, В. В. Волчуга [и др.] // материалы 47-й науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию БПИ. В 3 ч. Ч. 1. – Минск : БГПА, 1992. – С. 60.

УДК 66:665.693

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ПУТЕВЫХ МАШИН

*В. Л. МОЙСЕЕНКО, И. В. ТИТОВИЧ, И. А. МОРОЗ,
К. В. ДУМАРЕНОК*

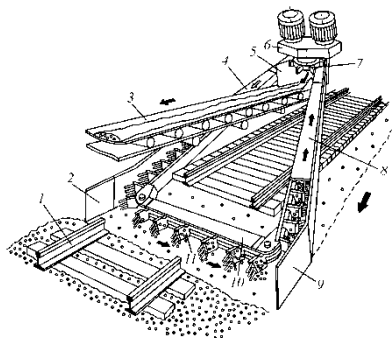
*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

На Белорусской железной дороге функционирует более ста различных типов путевых машин, в узлах трения которых используются как подшипники скольжения, так и подшипники качения. Эти машины работают в сложных условиях эксплуатации, включая воздействие абразивных материалов и высокую влажность. В условиях дефицита запчастей и их высокой стоимости возникает необходимость замены подшипников качения в некоторых узлах на подшипники из композиционных материалов. Примером такого применения являются щебнеочистительные машины RM-76 и RM-80, которые эксплуатируются в центре механизации путевых работ станции Пинск Белорусской железной дороги.

Переход на композиционные материалы может значительно

снизить затраты на обслуживание и повысить надежность работы машин. Они обладают высокой стойкостью к абразивному износу и коррозии, что делает их идеальными для использования в условиях повышенной влажности и наличия агрессивных частиц [1].

По статистике наиболее часто выходят из строя подшипники цепного скрепкового органа щелноочистительной машины RM-80 (рисунок 1) [2].



- 1 – путь;
- 2, 9 – подгребающие крылья;
- 3 – конвейер подачи вырезанного материала;
- 4, 8 – холостой и рабочий желоба;
- 5 – разгрузочный лоток;
- 6 – привод цепи;
- 7 – ведущая звездочка;
- 10 – подпутная направляющая балка;
- 11 – выгребная скребковая цепь

Рисунок 1 – Цепной скребковый рабочий орган

Нами разработана конструкция подшипникового узла на основе природного композиционного материала, заменяющего установленные в этих узлах сферические роликоподшипники (рисунок 2).

Изготавливали подшипники из следующих пород древесины: дуба, клена, березы и сосны.

При изготовлении образцов использовали заготовки влажностью $W = 8...10\%$. Технология изготовления для всех образцов была одинаковой, т. е. их термопластически деформировали, запрессовывали в металлические обоймы, пропитывали в минеральном масле МС-20, модифицированном высокомолекулярными присадками, устанавливали компенсаторы и растачивали до заданных размеров.

В качестве контртела использовали сталь 45 с твердостью поверхности HRC 45–50 ед. и шероховатостью $R_a = 2,5...1,25$ мкм. Перед испытаниями образцы прирабатывались при скорости скольжения $v = 0,5$ м/с и давлении $p = 1,5$ МПа.

Исследования влияния материала на коэффициент трения, износ и максимальную нагрузку проводились при скорости скольжения $v = 0,75$ м/с.

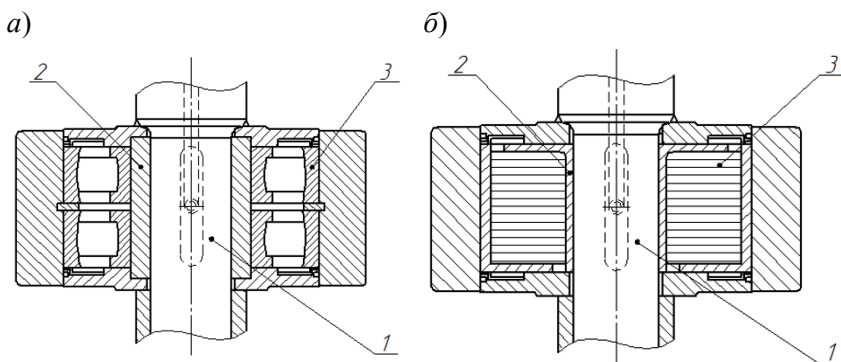


Рисунок 2 – Конструкция подшипникового узла:

а – сферический роликоподшипник;

б – подшипник на основе природного полимера;

1 – вал; 2 – втулка; 3 – подшипник

Установлено, что наименьшим коэффициентом трения при температуре в зоне трения $T = 110$ °С обладает материал из древесины сосны, наибольшим – березы.

Исследования по определению влияния породы древесины ПС на максимальную удельную нагрузку показали, что при одинаковой температуре в зоне трения $T = 110$ °С наибольшую нагрузку воспринимает материал из прессованной модифицированной древесины дуба и клена, и она достигает 4 МПа. Материал из древесины березы и сосны воспринимает нагрузку до 3,5 МПа.

Испытание на износ проводилось в режиме максимального давления нагрузки, при котором температура в зоне трения достигала 120 ± 5 °С

Износ древесины и роликов оценивали в граммах на метр пройденного пути по формуле

$$s = \pi d n t,$$

где d – диаметр ролика, $d = 0,04$ м; n – частота оборотов ролика, об/мин; t – время эксперимента, мин.

Износ определялся отношением изменения массы образца к пройденному пути

$$\Delta = j / S$$

Результаты этих вычислений приведены на диаграмме (рисунок 3).

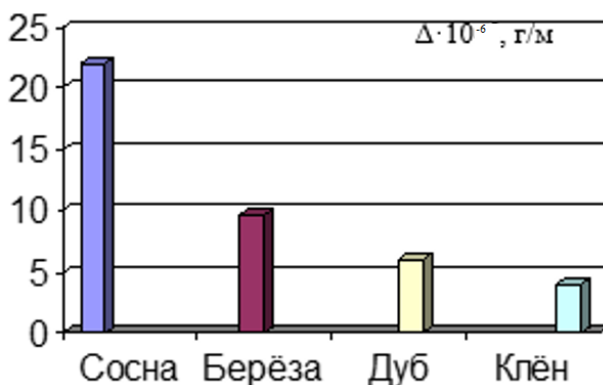


Рисунок 3 – Износ подшипников из древесины в зависимости от породы

Определено, что износ модифицированной прессованной древесины сосны значительно выше, чем у других пород, и составляет $22,1 \cdot 10^{-6}$ г/м. Наименьшим износом обладает древесина клена – около $4 \cdot 10^{-6}$ г/м.

Несмотря на то что древесина сосны обладает низким коэффициентом трения, ее использование для изготовления СПС не рекомендуется, т. к. она обладает наименьшей нагрузочной способностью и наибольшим износом. В то же время она еще и не технологична, т. к. для ее производства используется только древесина радиального среза, в котором всегда расположена сердцевина. При ТПД в сердцевине сосны возникают трещины, поэтому ее необходимо вырезать, что снижает и так низкий процент ее использования и вводит дополнительную операцию в технологический процесс.

Прессованная модифицированная древесина клена по своим

триботехническим характеристикам является наилучшей. У нее коэффициент трения равен $f = 0,079$ при нагрузочной способности $p = 4$ МПа, а износ наименьший (рисунок 3). Однако промышленное изготовление СПС из древесины клена вызывает затруднения, связанные с его малочисленностью на территории Республики Беларусь, а его импорт из других стран потребует валютных затрат.

Применение материала из древесины дуба усложняет технологический процесс, связанный с необходимостью его влаготермообработки для термопластической деформации.

Древесина березы является наиболее приемлемой для производства СПС, так как она является наиболее распространенной, в то же время ее триботехнические характеристики не намного отличаются от остальных материалов. Поэтому в дальнейшем все исследования проводили с использованием прессованной модифицированной древесины березы.

Список литературы

1 Врублевская, В. И. Износостойкие самосмазывающиеся антифрикционные материалы и узлы трения из них / В. И. Врублевская, А. Б. Невзорова, В. Б. Врублевский. – Гомель : БелГУТ, 2000. – 324 с.

2 Путевые машины : учеб. / М. В. Попович, В. М. Бугаенко, Б. Г. Волковойлов [и др.] ; под ред. М. В. Поповича, В. М. Бугаенко. – М. : Желдориздат, 2008. – 746 с.

КОНТАКТНАЯ ШОВНАЯ СВАРКА: МАКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 08Ю, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ ШОВНОЙ СВАРКИ

В. А. МОЛОЖАВСКИЙ

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

В данном научном тезисе целью является анализ влияния режимов сварки на состояние шва сварного соединения.

Контактная шовная сварка – механизированный способ сварки, при котором качество соединений зависит не от квалификации сварщика, а от настройки машины. Стабильность качества несоизмеримо выше, чем у процессов дуговой сварки, поскольку значительно меньше влияние возмущающих факторов [1].

Шовная сварка – вид контактной сварки, при которой сварной шов образуется путем постановки последовательного ряда перекрывающихся друг друга сварных точек, что обуславливает его плотность и герметичность (рисунок 1).

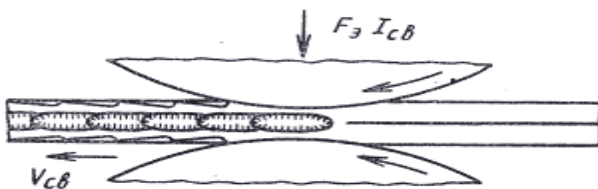


Рисунок 1 – Схема шовной сварки

На основании выше изложенного объектом исследований стала отдельно взятая сварная точка, полученная при различных режимах сварки. В качестве основного материала для заготовок (пластин) использовали сталь 08Ю толщиной 2 мм. Для проведения исследований были нарезаны пластины размером 10×100×2 мм в количестве 12 штук. Из двух таких заготовок получали образец путем сварки внахлест на точечной контактной машине МТП-75 (рисунок 2).

Таким образом, было получено 3 образца с различной силой

сварочного тока (9 кА; 12 кА; 16 кА) и 3 образца с различным временем сварки (0,32 с; 0,6 с; 1,0 с) (таблица 1).

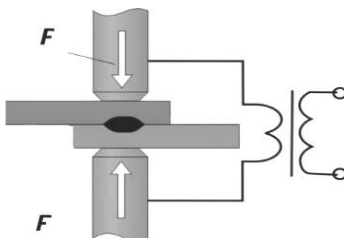


Рисунок 2 – Схема точечной сварки

На рисунке 3 представлена циклограмма точечной сварки, а на рисунке 4 – общий вид сварного образца.

Макроскопическое строение сварной точки условно можно разделить на три зоны: основного металла, термического влияния (зона цветов побежалости) и литого ядра.

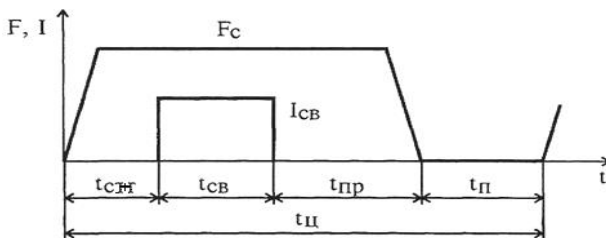


Рисунок 3 – Циклограмма точечной сварки:

$t_{ц}$ – время цикла; $t_{сж}$ – время сжатия; $t_{св}$ – время сварки; $t_{пр}$ – время проковки;
 $t_{п}$ – время паузы

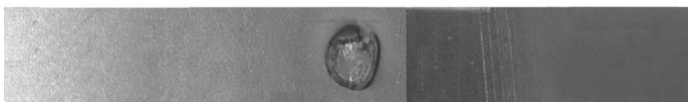


Рисунок 4 – Общий вид сваренного образца

Таблица 1 – Режимы сварки образцов

Номер образца	Сила тока $I_{св}$, кА	Усилие сжатия $F_{св}$, кН	Время сварки $t_{св}$, с	Время проковки $t_{пр}$, с
1	12	2,7	0,32	0,1
2			0,6	
3			1,0	
4	9	2,7	0,32	0,1

В процессе исследований проводили измерение ширины зоны цветов побежалости и зоны литого ядра. Данные результаты представлены в таблице 2, на их основании построены зависимости размеров литого ядра и ширины зоны цветов побежалости от длительности сварочного импульса, а также от силы сварочного тока (рисунок 5).

При неизменной силе сварочного тока $I_{св}$ время сварки $t_{св}$ определяет количество теплоты $Q_{эз}$, которое в этом случае выделяется в зоне формирования соединения пропорционально длительности импульса тока. Анализируя полученные на рисунке 5 зависимости, можно сделать заключение о том, что с увеличением времени сварки растет величина проплавления деталей и в большей мере диаметр ядра $d_{я}$ расплавленного металла. Пропорционально $d_{я}$ увеличивается ширина зоны цветов побежалости, так как возрастает величина теплоотвода в окружающий металл.

Таблица 2 – Результаты исследований геометрических параметров сварной точки

Параметр	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
Размер литого ядра, мм	6,5	7	8	На данном режиме образец не сварился	7	8
Ширина зоны цветов побежалости, мм	12	8,5	10		11	12

Сила сварочного тока $I_{св}$ является одним из основных параметров сварочного режима, поскольку при неизменной длительности его импульса $t_{св}$ определяет не только количество энергии, выделяющейся в зоне сварки, но и, что наиболее важно для процесса формирования

соединения, градиент ее увеличения по времени. Вследствие этого именно сила сварочного тока определяет скорость нагрева металла в зоне формирования соединения.

Анализируя зависимости, полученные на рисунке 5, можно сделать заключение о том, что сила сварочного тока существенно влияет на размеры ядра расплавленного металла и соответственно на зону цветов побежалости. С увеличением силы сварочного тока $I_{св}$ в промежутке от 8 до 12 кА диаметр ядра $d_я$ и ширина зоны цветов побежалости Π_3 растут почти прямо пропорционально изменению $I_{св}$, при силе сварочного тока $I_{св}$ более 12 кА величина $d_я$ и Π_3 увеличивается, но в значительно меньшей степени.

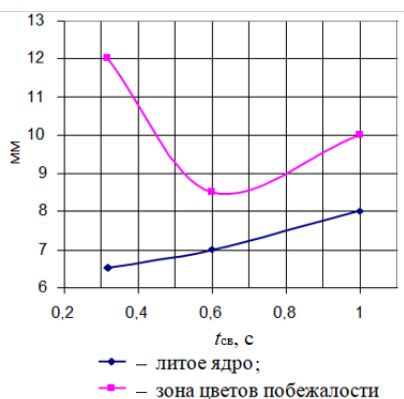



Рисунок 5 – Зависимости размеров литого ядра и ширины зоны цветов побежалости от длительности сварочного импульса

В таблице 3 представлены полученные после травления макрошлифы.

Таблица 3 – Макрошлифы исследуемых образцов

Номер образца	Параметр
Образец № 1	Режим сварки: сила сварочного тока $I_{св} = 12$ кА; усилие сжатия $F_c = 2,7$ кН; время сварки $t_c = 0,32$ с; время проковки $t_{пр} = 0,1$ с
	

Окончание таблицы 3

Номер образца	Параметр
Образец № 2 	Режим сварки: сила сварочного тока $I_{св} = 12 \text{ кА}$; усилие сжатия $F_c = 2,7 \text{ кН}$; время сварки $t_c = 0,6 \text{ с}$; время проковки $t_{пр} = 0,1 \text{ с}$
Образец № 3 	Режим сварки: сила сварочного тока $I_{св} = 12 \text{ кА}$; усилие сжатия $F_c = 2,7 \text{ кН}$; время сварки $t_c = 1,0 \text{ с}$; время проковки $t_{пр} = 0,1 \text{ с}$
Образец № 4 На данном режиме не сварился	Режим сварки: сила сварочного тока $I_{св} = 9 \text{ кА}$; усилие сжатия $F_c = 2,7 \text{ кН}$; время сварки $t_c = 0,32 \text{ с}$; время проковки $t_{пр} = 0,1 \text{ с}$
Образец № 5 	Режим сварки: сила сварочного тока $I_{св} = 12 \text{ кА}$; усилие сжатия $F_c = 2,7 \text{ кН}$; время сварки $t_c = 0,32 \text{ с}$; время проковки $t_{пр} = 0,1 \text{ с}$
Образец № 6 	Режим сварки: сила сварочного тока $I_{св} = 16 \text{ кА}$; усилие сжатия $F_c = 2,7 \text{ кН}$; время сварки $t_c = 0,32 \text{ с}$; время проковки $t_{пр} = 0,1 \text{ с}$

Анализируя полученные макрошлифы сварных точек, на образцах № 1, 2 и 6 можно выявить следующие дефекты литой зоны сварного соединения: трещины, рыхлости и усадочные раковины (рисунок 6).

Трещины образуются под действием растягивающих напряжений, возникающих в месте сварки вследствие неравномерного нагрева и интенсивного охлаждения. В этих условиях образуются в основном горячие трещины, в температурном интервале хрупкости. Основная причина возникновения трещин – слишком жесткий режим или несвоевременное приложение усилия проковки. В центре ядра

возможно образование различных несплошностей (рыхлот, раковин). Причинами этого дефекта являются загрязнение поверхностей и недостаточное усилие сжатия при сварке [2].

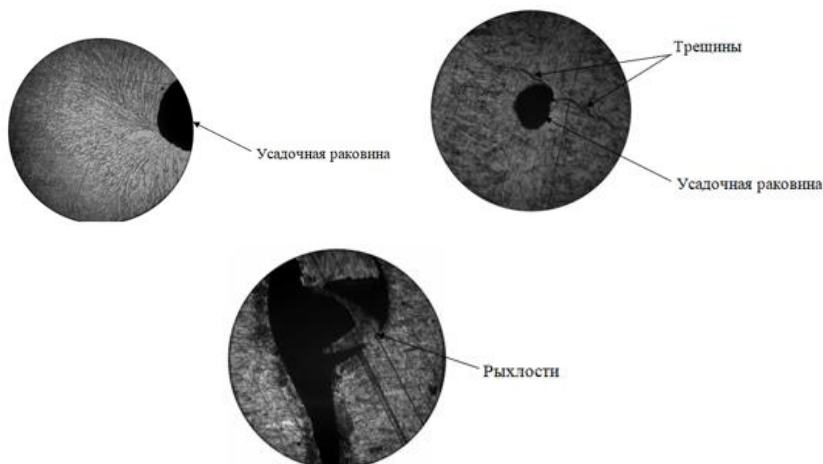


Рисунок 6 – Дефекты литой зоны сварного соединения

К дефектам, выявленным при визуальном осмотре сварного соединения, можно отнести выплески (рисунок 7). Их разделяют на наружные и внутренние. Наружный выплеск связан с перегревом металла в зоне контакта электрод – деталь. Внутренний выплеск может быть начальным и конечным. Начальный выплеск часто образуется при работе машин на скоростных режимах, особенно при включении тока асинхронными контакторами. Конечный выплеск связан с локальным образованием зазора в уплотняющем пояске. Выплески обычно увеличивают глубину вмятины, выявляются они внешним осмотром. Причины выплесков: недостаточное усилие сжатия, большая сила сварочного тока и длительное его протекание, высокое контактное сопротивление, малое усилие сжатия, неправильная установка и заправка электродов [3].

В процессе макроскопических исследований выполнили измерение ширины зоны цветов побежалости и зоны литого ядра. По результатам построили зависимости размеров литого ядра и ширины зоны цветов побежалости от длительности сварочного импульса, а также от силы сварочного тока.

Анализируя первые зависимости, сделали заключение о том, что с увеличением времени сварки растет величина проплавления деталей и в большей мере диаметр ядра $d_{\text{я}}$ расплавленного металла. Пропорционально $d_{\text{я}}$ увеличивается ширина зоны цветов побежалости, так как возрастает величина теплоотвода в окружающий металл.

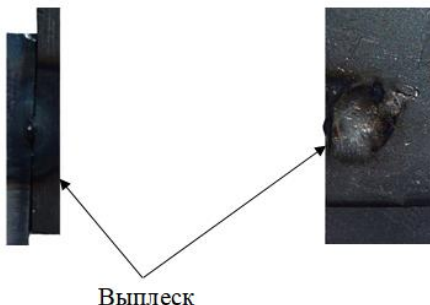


Рисунок 7 – Дефекты, выявленные при визуальном осмотре

Анализируя вторые зависимости, сделали заключение о том, что сила сварочного тока существенно влияет на размеры ядра расплавленного металла и соответственно на зону цветов побежалости. С увеличением силы сварочного тока $I_{\text{св}}$ в промежутке от 8 до 12 кА диаметр ядра $d_{\text{я}}$ и ширина зоны цветов побежалости Ш_3 растут почти прямо пропорционально изменению $I_{\text{св}}$, при силе сварочного тока $I_{\text{св}}$ более 12 кА величина $d_{\text{я}}$ и Ш_3 увеличивается, но в значительно меньшей степени.

Список литературы

- 1 Сварка и резка в промышленном строительстве : в 2 т. Т. 1 / Б. Д. Малышев, А. И. Акулов, Е. К. Алексеев [и др.] ; под ред. Б. Д. Малышева. – М. : Стройиздат, 1989. – 590 с.
- 2 Гуляев, А. И. Технология и оборудование контактной сварки : учеб. пособие для техникумов / А. И. Гуляев. – М. : Машиностроение, 1992. – 254 с.
- 3 Козловский, С. Н. Основы теории и технологии контактной точечной сварки : монография / С. Н. Козловский. – Красноярск : СибГАУ, 2003. – 235 с.

СЛОИСТЫЙ НАНОДВОЙНИКОВЫЙ КОМПОЗИТ

О. М. ОСТРИКОВ

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Такое новое физическое явление, как нанодвойникование, впервые было описано в работе [1]. Дислокационная модель остаточного нанодвойника клиновидной и линзовидной формы представлена в работах [2–4]. В работах [3–6] предложено использовать нанодвойникование для синтеза материалов нового поколения – нанокомпозитов. При этом управлять распределением нанофаз, образующихся внутри нанодвойников или у их границ, в матрице несдвойникового материала возможно различными схемами деформирования двойникового кристалла.

Для разработки новых экономически целесообразных технологий создания наноматериалов представляет интерес изучение двойниковых прослоек шириной от нескольких до сотен нанометров [3].

Целью данной работы стала разработка методики расчета распределения легирующего компонента в системе параллельных двойниковых прослоек малой ширины для теоретического обоснования целесообразности технологии получения нанокомпозитов на основе явления полисинтетического нанодвойникования.

На рисунке 1 схематически показан полисинтетический нанодвойник, который представляет собой чередование в кристалле сдвойникованных и несдвойникованных областей. Ширину двойниковой прослойки обозначим H , а расстояние между двумя соседними прослойками – D .

Если величины H и D принять не превышающими сотни нанометров, то материал, содержащий полисинтетический нанодвойник, можно рассматривать как новый класс композиционных материалов, полученных армированием кристаллов нанодвойниковыми прослойками. Рассчитать поля напряжений в

таком нанодвойниковом композите можно по методике, разработанной в [3], согласно которой

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx}^{(1)} &= \frac{\mu b_{\text{кп}}}{2\pi(1-\nu)} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(y-nh)[3(x-m(D+H))^2 + (y-nh)^2]}{[(x-m(D+H))^2 + (y-nh)^2]^2}, \\
\sigma_{yy}^{(1)} &= \frac{\mu b_{\text{кп}}}{2\pi(1-\nu)} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(y-nh)[(x-m(D+H))^2 - (y-nh)^2]}{[(x-m(D+H))^2 + (y-nh)^2]^2}, \\
\sigma_{zz}^{(1)} &= -\frac{\mu b_{\text{кп}} \nu}{\pi(1-\nu)} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(y-nh)^2}{(x-m(D+H))^2 + (y-nh)^2}, \\
\sigma_{xy}^{(1)} &= \frac{\mu b_{\text{кп}}}{2\pi(1-\nu)} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(x-m(D+H))[(x-m(D+H))^2 - (y-nh)^2]}{[(x-m(D+H))^2 + (y-nh)^2]^2}, \\
\sigma_{zx}^{(1)} &= -\frac{\mu b_{\text{кп}}}{2\pi} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(y-nh)^2}{(x-m(D+H))^2 + (y-nh)^2}, \\
\sigma_{zy}^{(1)} &= \frac{\mu b_{\text{кп}}}{2\pi} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(x-m(D+H))^2}{(x-m(D+H))^2 + (y-nh)^2}; \tag{1} \\
\sigma_{xx}^{(2)} &= \frac{\mu b_{\text{кп}}}{2\pi(1-\nu)} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(y-nh)[3(x-m(D+H)-H)^2 + (y-nh)^2]}{[(x-m(D+H)-H)^2 + (y-nh)^2]^2}, \\
\sigma_{yy}^{(2)} &= \frac{\mu b_{\text{кп}}}{2\pi(1-\nu)} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(y-nh)[(x-m(D+H)-H)^2 - (y-nh)^2]}{[(x-m(D+H)-H)^2 + (y-nh)^2]^2}, \\
\sigma_{zz}^{(2)} &= -\frac{\mu b_{\text{кп}} \nu}{\pi(1-\nu)} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(y-nh)^2}{(x-m(D+H)-H)^2 + (y-nh)^2}, \\
\sigma_{xy}^{(2)} &= \frac{\mu b_{\text{кп}}}{2\pi(1-\nu)} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(x-m(D+H)-H)[(x-m(D+H)-H)^2 - (y-nh)^2]}{[(x-m(D+H)-H)^2 + (y-nh)^2]^2},
\end{aligned}$$

$$\sigma_{zx}^{(2)} = -\frac{\mu b_n}{2\pi} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(y-nh)^2}{(x-m(D+H)-H)^2 + (y-nh)^2},$$

$$\sigma_{zy}^{(2)} = \frac{\mu b_n}{2\pi} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \frac{(x-n(D+H)-H)^2}{(x-m(D+H)-H)^2 + (y-nh)^2}, \quad (2)$$

где μ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; n и m – индексы суммирования; N – число дислокаций на двойниковой границе; M – число двойников в полисинтетическом двойнике; $\sigma_{ij}^{(1)}$ и $\sigma_{ij}^{(2)}$ – напряжения, создаваемые двумя границами единичной двойниковой прослойки, входящей в состав полисинтетического двойника; h – расстояние между двойниющими дислокациями; b_{κ} и b_n – модули соответственно краевой и винтовой составляющей вектора Бюргерса двойнивающей дислокации.

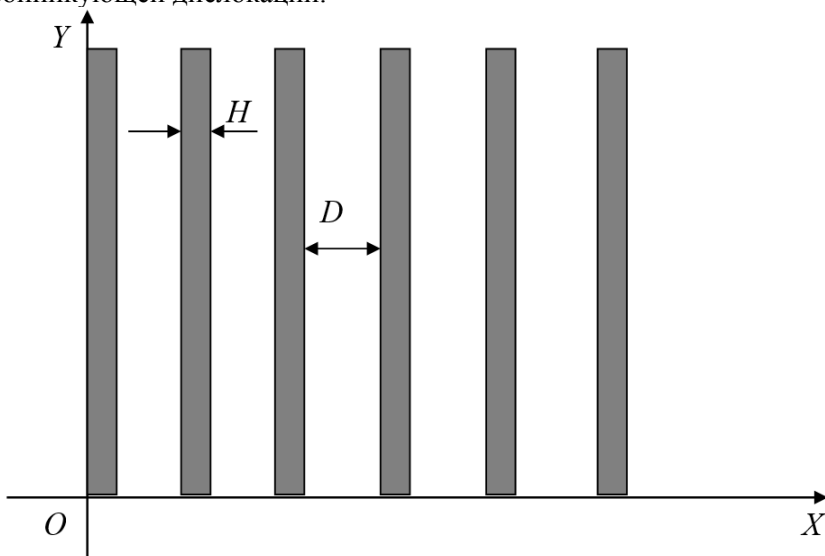


Рисунок 1 – Схематическое изображение полисинтетического нанодвойника

Учитывая, что на двух границах двойника дислокации имеют противоположный знак, результирующие напряжения определяются из соотношения

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(1)} - \sigma_{ij}^{(2)}. \quad (3)$$

Наличие в кристалле внутренних напряжений, обусловленных двойниковыми границами, приводит к перераспределению легирующего компонента, концентрация C которого рассчитывается по формуле [7]

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \quad (4)$$

где C_0 – концентрация легирующего компонента вдали от внутренних источников напряжений; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; U – энергия взаимодействия легирующего компонента с двойниковыми границами, которая находится по формуле [7]

$$U = -\frac{4}{3}\pi r^3 \varepsilon (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}). \quad (5)$$

Здесь r – радиус атома матрицы; $\varepsilon = (r_0 - r)/r$ – малый параметр (r_0 – радиус атома легирующего компонента); σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{zz} – нормальные компоненты тензора напряжений, определяемые из (3).

Согласно формулам (4) и (5), благодаря перераспределению легирующего компонента полями внутренних напряжений, в нанодвойниковых прослойках возможно формирование новых фаз, образование которых в бездефектной области кристалла невозможно. Это дает основу для технологии создания новых композиционных материалов, таких как слоистые нанодвойниковые композиты.

Таким образом, впервые рассмотрен новый класс композиционных материалов – слоистые нанодвойниковые композиты, для технологии которых заложены теоретические основы.

Список литературы

- 1 **Остриков, О. М.** Нанодвойникование монокристаллов висмута / О. М. Остриков // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 3. – С. 51–52.
- 2 **Остриков, О. М.** Дислокационная модель нанодвойника / О. М. Остриков // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2008. – № 5. – С. 124–129.
- 3 **Остриков, О. М.** Механика двойникования твердых тел : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.
- 4 **Остриков, О. М.** Методика прогнозирования распределения полей напряжений в реальных кристаллах с остаточными некогерентными двойниками : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 278 с.
- 5 **Остриков, О. М.** Формирование наноразмерных фаз в нанодвойниках / О. М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3. – С. 3–7.
- 6 **Остриков, О. М.** Нанодвойникование, как эффективный способ формирования композитов с наноразмерными включениями / О. М. Остриков // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий : материалы IX Междунар. семинара, Обнинск 12–16 июня 2007 г. – Обнинск : ИАТЭ, 2007. – С. 89–90.
- 7 Физика кристаллов с дефектами / А. А. Предводителей, Н. А. Тяпунина, Г. М. Зиненкова, Г. В. Бушуева. – М. : Изд-во МГУ, 1986. – 240 с.

УДК 625.8

АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ СОСТАВОМ ГИДРОФОБНЫМ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИМ

В. В. ПЕТРУСЕВИЧ, В. В. ТОМАШОВ

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Негативное влияние погодно-климатических факторов, а также значительный рост интенсивности автомобильного движения приводит к несвоевременному выходу из строя объектов транспортной инфраструктуры в Республике Беларусь.

В статье приведен один из возможных вариантов защиты асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог от указанных выше разрушающих факторов, которым является разработанный состав гидрофобный профилактический (далее – СГП) [1]. Проведенные ранее исследования по анализу влияния СГП на физико-механические характеристики и эксплуатационные свойства

асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги показали положительный результат [2, 3]

Материал, используемый при написании данной работы, получен при реализации инновационного проекта «Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог» при финансировании Государственным комитетом по науке и технологиям и Государственным пограничным комитетом на оборудовании «Гомельоблдорстрой».

Предлагаемая технология профилактической обработки асфальтобетонного покрытия прошла производственную апробацию в соответствии с ТУ ВУ 192670194.002–2019 [4] на следующих объектах:

1) участке автомобильной дороги четвертой технической категории Н-4321 «Стрешин – Нижняя Олба», эксплуатируемой ДРСУ-149 КПРСУП «Гомельоблдорстрой», протяженностью 2000 м;

2) участке подъездной автомобильной дороги к пограничной заставе «Дзержинск» Мозырского пограничного отряда Государственного пограничного комитета протяженностью 1850 м.

В ходе реализации совместной программы «Пограничная безопасность» научно-технического сотрудничества между учреждением образования «Белорусский государственный университет транспорта» и Государственным пограничным комитетом Республики Беларусь, утвержденной постановлением Совета Министров от 2 декабря 2020 г. № 688 дсп «О государственной программе «Пограничная безопасность» на 2021–2025 гг.», по повышению безопасности транспортной инфраструктуры Государственного пограничного комитета 10 октября 2023 г. было выполнено обследование участка подъездной автомобильной дороги к пограничной заставе «Дзержинск» Мозырского пограничного отряда Государственного пограничного комитета, в результате которого серьезных дефектов асфальтобетонного покрытия не выявлено.

Основные характеристики внедрения СГП для обработки объектов транспортной инфраструктуры Государственного пограничного комитета Республики Беларусь приведены в таблице 1, технологические режимы распределения СГП приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Основные характеристики внедрения СГП

Компонент	Количество, %
Нефтешлам (шлам очистки резервуаров ОАО «Мозырский НПЗ»)	65
Органический растворитель (керосин)	13
Минеральный наполнитель (отход сахарного производства ОАО «Слущкий сахарорафинадный завод»)	12
Гидрофобизатор (кремнийорганическая гидрофобизирующая жидкость ТУ 2229-008-42942526-00)	10
<i>Примечание – Источник: собственная разработка.</i>	

Результаты наблюдения за обработанным участком:

– контрольный осмотр и периодические наблюдения в течение осенне-зимне-весеннего периода 2019/2020 показали, что для обработанного составом гидрофобным профилактическим «ПРОТЕКТ-01» ТУ ВУ 192670194.002-2019 участка автомобильной дороги четвертой технической категории Н-4321 «Стрешин – Н. Олба» нет необходимости в устройстве однослойной поверхностной обработки запланированной в 2020 году;

– контрольный осмотр показал, что для обработанного составом гидрофобным профилактическим «ПРОТЕКТ-01» ТУ ВУ 192670194.002-2019 участка подъездной автомобильной дороги к пограничной заставе «Дзержинск» Мозырского пограничного отряда нет необходимости в выполнении мероприятий в рамках текущего содержания данного участка автомобильной дороги.

Таблица 2 – Основные технологические режимы распределения СГП

Показатель	Значение
Ширина распределения, м	3,5
Норма распределения, л/м ²	0,5–0,7
Протяженность обработанного участка, м	1850
Температура окружающей среды при распределении СГП, °С	+7,5
Температура дорожного покрытия при распределении СГП, °С	+7,0

Окончание таблицы 2

Показатель	Значение
Температура распределения СГП, °С	+70

Тип и марка машины для распределения	Автогудронатор АРБ-7
Состояние дорожного покрытия перед распределением СГП	Сухое, чистое
<i>Примечание – Источник: собственная разработка.</i>	

Базируясь на производственном опыте профилактических обработок объектов дорожной сети уточнена технология обработки асфальтобетонного покрытия, разработанным СГП.

Список литературы

1 Патент ВУ 24097, МПК E01C 11/24 (2006.01). Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог : № а20180114 : заявлено 23.03.2018 : опубл. 30.10.2023 / Бочкарев Д. И., Петрусевиц В. В. ; заявители Бочкарев Д. И., Петрусевиц В. В. – 5 с.

2 **Петрусевиц, В. В.** Исследование влияния состава гидрофобного профилактического «ПРОТЕКТ-01» на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В. В. Петрусевиц // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 4. – С. 294–300.

3 Методология оценки воспроизводимости коэффициента сцепления асфальтобетонного покрытия при его профилактической обработке в лабораторных и реальных условиях дорожных испытаний / Д. И. Бочкарев, В. М. Шаповалов, В. В. Петрусевиц, П. А. Кацубо // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 1. – С. 25–30.

4 ТУ ВУ 192670194.002–2019. Состав гидрофобный профилактический ПРОТЕКТ-01. – Введ. 03.10.2019. – Минск : Минстройархитектуры, 2019. – 29 с.

ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ БУЛЬДОЗЕРА

Н. А. ПИНЧУК

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

К материалам рабочих органов в зависимости от условий эксплуатации машин предъявляются требования по различным свойствам: ударной и статической прочности, износо- и коррозионной стойкости. Рабочие органы строительных и дорожных машин работают в условиях интенсивного взаимодействия с грунтами и дорожно-строительными материалами. Поэтому определяющей характеристикой материалов рабочих органов является их износостойкость, которая, как правило, обеспечивается высокой твердостью поверхностных слоев.

Для **базовых элементов** (отвалов) используют высокоуглеродистые легированные стали, которые способны выдерживать ударные, циклические и динамические нагрузки. Легированные стали имеют гарантированный химический состав, стабильные механические свойства и обязательно подвергаются термической обработке.

Для **съёмных элементов** (ножей), подвергающихся интенсивному абразивному износу, широко применяют отливки из высокомарганцовистых сталей. Они обладают повышенной износостойкостью и ударной вязкостью, поэтому их применяют для зубьев, корпусов и других деталей отвалов бульдозеров.

Отдельную группу составляют **наплавочные материалы**, которые придают прочность, износостойкость и ударную вязкость элементам рабочего оборудования на глубину, обеспечивающую заданный ресурс их работы. В зависимости от химического состава их целесообразно разделить на следующие подгруппы:

- 1) низколегированные стали;
- 2) высоколегированные стали;
- 3) сплавы на основе железа;

4) композиционные материалы на основе железа и карбидов.

Низколегированные стали первой группы с содержанием легирующих элементов до 5 % применяют для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, а также эксплуатирующихся при умеренных нагрузках и повышенных температурах (до 300 °С). Их наплавляют на ножи бульдозеров, а также на детали ходовой части транспортных средств.

Высоколегированные стали второй группы используют для наплавки деталей, подверженных абразивному и ударно-абразивному изнашиванию, например деталей рабочих органов землеройных, землеройно-транспортных машин. В их числе высокомарганцовистые аустенитные стали, которые в результате наклепа при трении приобретают высокую износостойкость.

Высокое содержание карбидов хрома, вольфрама и молибдена обеспечивает стойкость стали по отношению к абразивному износу, который сопровождается несильными ударами. Большая устойчивость карбидов в сталях способствует сохранению высокой износостойкости наплавленного слоя даже при длительном контакте с раскаленным металлом.

К третьей группе принадлежат **сплавы на основе железа** (хромокобальтовые и никелевые сплавы), легированные хромом и другими элементами. Сплавы обладают высокой стойкостью при абразивном изнашивании и выдерживают умеренные удары. Их используют для упрочнения ножей бульдозера, а также других машин для земляных работ.

Долговечность наплавленного слоя зависит от чистоты поверхности упрочняемой детали. Поэтому при наплавке стеллита поверхность основного металла следует тщательно очистить от загрязнений (масла, окалины и др.). Для предотвращения образования трещин необходимы предварительный нагрев детали и ее медленное охлаждение после наплавки (в печи или под слоем теплоизоляционного материала).

К четвертой группе износостойких сплавов относятся **композиционные материалы**, состоящие из матрицы и твердых частиц, которые вводят в матрицу в процессе наплавки. Как правило, в качестве упрочняющих частиц используют карбиды вольфрама, которые по твердости превосходят карбиды большинства металлов при достаточно высокой пластичности. В качестве матрицы

используют различные сплавы, обеспечивающие хорошее смачивание зерен карбидов, достаточную прочность и вязкость. Для этого применяют сплавы на основе никеля и меди, легированные (на основе хрома) чугуны и стали.

УДК 631.312.021.3

ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЗЕМЛЕОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

А. Н. ПОПОВ, А. А. КРИВЕНКОВ

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Рабочие органы почвообрабатывающих машин в процессе эксплуатации интенсивно изнашиваются в результате абразивного износа на сухих песчаных почвах, т. к. содержащийся в них кварц имеет твердость до 1200 HV, в то время как твердость металла составляет 350–400 HV [1].

Целью работы является повышение стойкости к абразивному изнашиванию лемехов плугов и определение оптимальных параметров электрофрикционного плазменного упрочнения.

В основе данного метода поверхностного упрочнения лежит создание сильноточного разряда в жидкой среде, как правило в воде, при трении обрабатывающего вращающегося инструмента и его перемещении относительно обрабатываемой поверхности [2]. Под действием сил, возникающих в канале разряда, материал выбрасывается из зоны разряда на поверхность упрочняемого изделия, где охлаждается рабочей жидкостью (водой) и застывает на ее поверхности с образованием упрочненного слоя. Одновременно происходит закалка поверхностного слоя основного металла. В данной работе обрабатывающий инструмент, представляющий собой диск диаметром 150 мм и толщиной 20 мм, был изготовлен из чугуна.

Исследования микроструктуры проводили на автоматическом структурном анализаторе «EPIQUANT». Твердость определялась на

микротвердомере ПМТ-3. Испытания образцов на абразивное изнашивание проводилось на дисковой машине трения, в качестве контртела был выбран незакрепленный абразив – песок.

Изучено влияние режимов обработки на твердость и толщину полученного слоя. Величина тока варьировалась от 200 до 400 А, скорость вращения обрабатываемого диска от 1 до 3 м/с, скорость подачи от 0,5 до 2 м/мин.

После электрофрикционного плазменного упрочнения на поверхности стали можно выделить 4 зоны: зона нанесенного слоя (отбеленный чугун), зона упрочненного слоя, промежуточная зона и зона основного металла. Нанесенный слой толщиной до 1 мм состоит из отбеленного чугуна и имеет твердость до 1000 НV. Твердость упрочненного слоя толщиной до 0,6 мм снижается по глубине с 800 до 400 НV, в промежуточной зоне толщиной порядка 0,15 мм наблюдается небольшое снижение твердости, около 10%, по сравнению с основным металлом. В нанесенном слое чугуна наблюдаются трещины, вызванные большими термическими напряжениями. В закаленном слое трещин не наблюдалось. После обработки шероховатость поверхности очень высокая, высота неровностей до 0,5 мм. Показано, что с увеличением силы тока твердость поверхностного слоя увеличивается, скорости подачи и вращения оказывают неоднозначное влияние.

Триботехнические испытания показали, что интенсивность изнашивания поверхностного слоя после электрофрикционного плазменного упрочнения уменьшилась более чем в 5 раз.

Список литературы

1 **Попов, А. Н.** Материаловедение и конструкционные материалы. В 2 ч. Ч. I. Основы металловедения : учеб.-метод. пособие / А. Н. Попов, М. А. Гетикова ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 128 с.

2 **Рогачев, А. В.** Восстановление и повышение износостойкости деталей машин : учеб. пособие / А. В. Рогачев, С. С. Сидорский ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 343 с.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОДЪЕМНИКОВ

Е. В. СИЛЕНОК

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

Введение. В ходе исследования рассмотрим возможность модернизации привода подъемника путем замены приводной цепи на приводной полимерный ремень модели типа ПУ-100 RPP8 с металлическим кордом.

Цель работы. Исследовать возможность применения в конструкции подъемника ремней из комплексных материалов.

Материалы и методы исследований. В качестве старого привода рассмотрим классический привод подъемника с применением приводной цепи и звездочки. И заменим его на приводной барабан ременной передачи. Рассмотрим подъемник грузоподъемностью 225 кг, типа НС.ПВ. Методом расчета подобран ремень ПУ-100 RPP8 (рисунок 1) с металлическим кордом. При проектировании привода необходимо разработать приводной ролик с зубчатым зацеплением и верхний ролик.

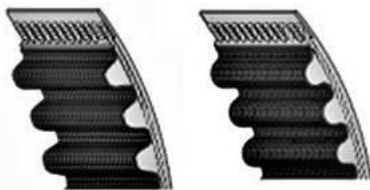


Рисунок 1 – Зубчатый ремень типа ПУ-100 RPP8

Результаты и их обсуждение. В результате применение конструкции с ременной передачей (рисунок 2) является наиболее эффективным, чем применение конструкции с цепной передачей (рисунок 3).

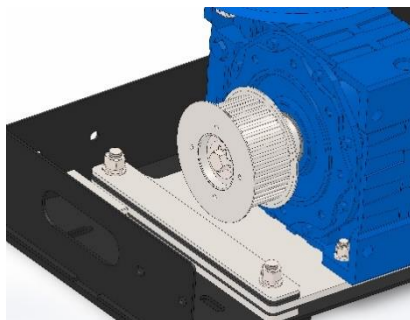


Рисунок 2 – Конструктив ременной передачи

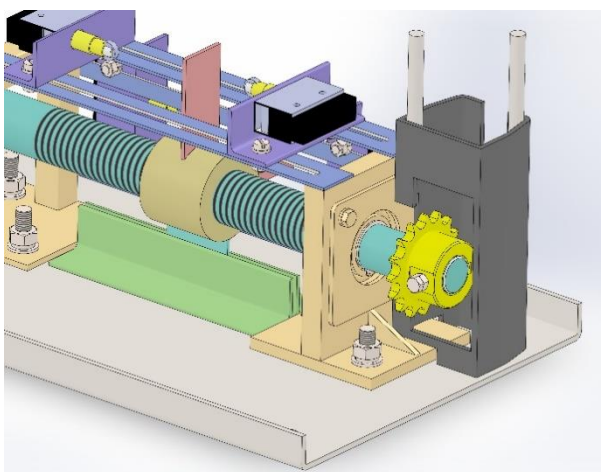


Рисунок 3 – Конструктив цепной передачи

Анализ конструктивного решения показал его состоятельность. Данная конструкция позволила улучшить эксплуатационные характеристики подъемника, сильно снизилась шумность в результате работы привода подъема. Также пропала необходимость в смазывании тягового элемента, что упростило обслуживание подъемника. Также данный тип привода оказался дешевле, особенно при проектировании подъемников с большой высотой подъема.

Вывод. В ходе исследований установлено, что разработанный конструктив является целесообразным, в результате его применения были улучшены эксплуатационные характеристики вертикального подъемника.

КИНЕТИКА ПЛАВЛЕНИЯ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ*И. И. СУТОРЬМА**Гомельский государственный технический университет
им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Рассмотрим процесс гомогенного плавления чистого металла. Подвергнем нагреву некоторое его количество массой M , находящееся в твердой фазе при начальной температуре T_S . В процессе нагрева твердая фаза переходит в жидкое (твердожидкое) состояние, характеризующееся температурой T_{SL} , и далее доводится до конечной температуры T_G , соответствующей температуре перехода в газообразное состояние (температура испарения). В твердожидком состоянии массу твердой фазы (исходный компонент) обозначим M_S , а массу жидкой фазы (конечный продукт) – M_L . Связь между исходным компонентом и конечным продуктом имеет вид

$$M = M_S + M_L. \quad (1)$$

Разделим обе части выражения на M . Получим

$$\frac{M_S}{M} + \frac{M_L}{M} = 1. \quad (2)$$

Обозначим

$$a = \frac{M_S}{M}, b = \frac{M_L}{M}. \quad (3)$$

Тогда

$$a + b = 1. \quad (4)$$

где a – концентрация твердой фазы (количество, доля в общей массе), кг/кг; b – концентрация жидкой фазы (количество, доля в общей массе), кг/кг.

В процессе плавления a изменяется от 1 до 0, а b изменяется от 0 до 1.

Чтобы отметить, что это именно процесс плавления, введем индекс L . В работе получена зависимость концентрации жидкой фазы от температуры в процессе плавления

$$b_L = \frac{1}{1 + e^{\frac{E}{RT} - \frac{E}{RT_{SL}}}}. \quad (5)$$

В процессе плавления температура изменяется в пределах

$$t_s \leq t \leq t_G \text{ или } T_s \leq T \leq T_G. \quad (6)$$

где t , T – текущая температура металла соответственно в °С и К; t_G , T_G – температура испарения металла соответственно в °С и К; t_s , T_s – начальная температура металла в твердой фазе соответственно в °С и К (удобно взять $t_s = 0$ °С или $T_s = 273$ К).

Количество жидкой фазы будет изменяться в пределах

$$0 \leq b_L \leq 1. \quad (7)$$

Зависимость количества жидкой фазы от температуры $b_L = f(T)$ в процессе плавления представлена на рисунке 1.

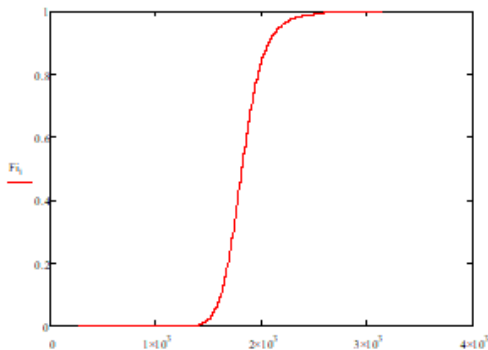


Рисунок 1 – Зависимость количества жидкой фазы b_L от температуры в процессе плавления чистого железа T , К

Задаваясь справочными значениями T_E , а также конечным значением $b_s = 0,999$ (погрешность 0,1 %), найдем численно оптимальные значения энергии активации процесса плавления для некоторых чистых металлов, получивших широкое применение в металлургии. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значение энергии активации E процессов плавления и кристаллизации некоторых чистых металлов

Металл	T_{SL} , К	T_G , К	Энергия активации E	
			$\times 10^7$, Дж/моль $\times 10^{14}$, эрг/моль	$\times 10^7$, кал/моль
Al	933	2773	8,8808	2,1225
Cu	1356	2573	18,1347	4,3342
Fe	1812	3153	26,9192	6,4337
Ti	1933	3533	26,9573	6,4428

В отличие от квазигазового и квазикристаллического подходов при рассмотрении жидкого состояния, в данной работе принят подход, основанный на принципе структурного дуализма в расплаве, соответствующего термодинамическому принципу двухфазности [1]. Вследствие этого он хорошо согласуется на микроуровне с кластерной моделью плавления и кристаллизации, например [2]. Следует особо отметить, что уравнения типа 5, в рамках рассмотрения процессов плавления и кристаллизации с позиций иных механизмов не дают адекватных результатов.

Численное решение зависимости (5) позволило получить приближенные теоретические значения энергий активации процессов гомогенного плавления некоторых чистых металлов, получивших широкое применение в технике.

В рамках предложенного подхода табличное значение энергии активации применимо как при взаимных переходах между твердым и твердожидким состояниями, так и между твердожидким и газообразным состояниями. Это обусловлено наличием особенности на кривой, представленной на рисунке 1, при плавлении (процесс идет скачкообразно) и отсутствием такой особенности при испарении (непрерывный переход между твердожидким и газообразным состояниями), что также хорошо представлено в работах прошлых лет [1–3].

Список литературы

- 1 Уббеллоде, А. Р. Расплавленное состояние вещества / А. Р. Уббеллоде. – М. : Металлургия, 1982. – 467 с.
- 2 Гаврилин, И. В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов / И. В. Гаврилин. – Владимир : Владимирский государственный университет, 2000. – 196 с.
- 3 Акулов, Н. С. Основы химической динамики / Н. С. Акулов. – М. : Изд-во МГУ, 1940. – 95 с.

УДК 625.85

ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОДАВОК В ДОРОЖНОМ АСФАЛЬТОБЕТОНЕ

В. В. ТОМАШОВ

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель*

В связи с возрастающим объемом дорожного строительства в Республике Беларусь увеличивается потребность в дорожно-строительных материалах. Недостаток последних значительно сдерживает темпы строительства автомобильных дорог и ведет к увеличению их стоимости. Повысить темпы и снизить себестоимость дорожного строительства можно только благодаря широкому применению местных дорожно-строительных материалов, а также отходов и побочных продуктов промышленности. Кроме того, отходы создают проблемы для окружающей среды, и утилизация отходов требует больших затрат.

К широко распространенным видам вторичного сырья, перспективным для использования в дорожном асфальтобетоне, относятся отсеvy песчано-гравийных смесей (далее – ОПГС), мелкозернистые угольные шлаки, волокнистые отходы химической промышленности, зола переработанных горючих сланцев (далее – ЗГС), отход спиртового и дрожжевого производства (гидролизный лигнин), отход сахарного производства (дефекат).

Отсевы песчано-гравийных смесей. В ходе переработки песчано-гравийных смесей образуются отходы в виде ОПГС, представляющих песчаные фракции с размером частиц менее 5 мм. Только на предприятиях треста «Дорстрой-индустрия» ежегодный объем выхода ОПГС составляет более 1,5 млн м³ и к настоящему времени в отвалах их накоплено около 3 млн м³.

Экспериментальные исследования, проведенные в БНТУ, показали, что ОПГС могут широко применяться при производстве асфальтобетонных смесей, но для этого необходимо проводить соответствующее обогащение и активацию мелких песчаных фракций, входящих в ОПГС. В качестве средства обогащения может использоваться метод пневмосепарации, который по сравнению с классификацией на грохотах является более эффективным. В процессе пневматического транспортирования мелких фракций песка по трубам из рабочей камеры пневмосепаратора в циклон происходит трибоэлектризация песчаных частиц. После их обработки соответствующим поверхностно-активным веществом (далее – ПАВ) на выходе в циклон они могут быть использованы для приготовления асфальтобетона по известной технологии.

Научные эксперименты подтвердили техническую приемлемость и экономическую эффективность трибоактивированных ОПГС и их использования в плотных и пористых асфальтобетонах [1].

Мелкозернистые угольные шлаки, образующиеся после сжигания каменного угля, очень перспективны в качестве сырья для получения минерального порошка.

Шлак содержит до 0,8 % недожженного угля. По зерновому составу он приближается к песку с модулем крупности 3,09. Наличие в шлаке частиц, обладающих малой прочностью, не позволяет эффективно его использовать в качестве песчаной составляющей асфальтобетона, поэтому шлак был исследован с целью применения в качестве минерального порошка.

В результате помола в шаровой мельнице из золы получали минеральный порошок. Научные испытания по ГОСТ 12784-78 показали, что по своим свойствам шлак полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ 16557-78, предъявленным к неактивированным минеральным порошкам. Полученный песчаный асфальтобетон типа «Д» (на природном песке), содержащий минеральный порошок из угольного шлака, отвечает требованиям ГОСТ 912884, за

исключением показателя прочности при 0 °С. Состав с минеральным порошком из каменноугольного шлака более битумоемок. Поэтому с целью снижения битумоемкости смеси рационально применить минеральный порошок из угольного шлака, активированный любым из известных способов. Проведенные научные исследования позволили сделать вывод, что каменноугольный шлак после его домола может быть использован в качестве минерального порошка в составе песчаного асфальтобетона типа «Д» (II марка), а также применение активированного минерального порошка из каменноугольного шлака обеспечивает снижение расхода битума в смеси на 10–15 % и повышение трещиностойкости асфальтобетона на 20 % при достаточно высоких показателях других физико-механических свойств [1].

Волокнистые отходы химической промышленности. Данные отходы делятся на три группы:

- искусственные волокна – гидратцеллюлозные (вискоза);
- химические – полиамидные (лавсан), полиэфирные (капрон);
- неорганические – стекловолокно, углеродные, борные волокна, асбест.

К наиболее распространенным относятся капроновый и вискозный корд, грубое стекловолокно, мягкое стекловолокно, лавсановая кордная нить.

Исследования по применению в асфальтобетоне лавсановой кордовой нити позволили предложить следующий расчетный состав дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси, %: щебень фракции 5–20 мм, песок (средний) с модулем крупности 2,3–5,1, минеральный доломитовый порошок – 10, волокно – 1, битум БНД 60/90 – 5,8

Свойство дисперсно-армированного асфальтобетона оптимального состава полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ 9128-84 на плотный асфальтобетон типа Б марки II.

Научные исследования показали, что модуль упругости дисперсно-армированного асфальтобетона в 2 раза выше, чем неармированного. Асфальтобетон, армированный волокнами из резанного корда, обладает значительно высокими упругими характеристиками, чем неармированный асфальтобетон. Использование дисперсно-армированного асфальтобетона позволяет укладывать экономичные тонкослойные асфальтобетонные дорожные покрытия [1].

Зола горючих сланцев (далее – ЗГС) – продукт переработки последних по энерготехнологической схеме (сухая перегонка), подлежащий утилизации. Проведенные ранее научные исследования показали, что минеральная часть переработанных горючих сланцев состоит из кремнезема с остатками органических веществ (1–1,5 %). По гранулометрическому составу зола относится к очень мелким пескам с содержанием кремнезема, изменяющимся в широких пределах (40–70 %), имеет большую удельную поверхность и, как все кислые материалы, плохо взаимодействуют с органическим вяжущим, поэтому использование в асфальтобетоне без дополнительной модификации является нецелесообразным.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что ЗГС целесообразно применять в качестве активированного минерального порошка для асфальтобетона. Авторами работы показано, что при пневмотранспортировании зольной части горючих сланцев по металлическим трубопроводам одновременно с процессом трибоэлектризации частиц идет процесс частичного их дробления, позволяющий приблизить исходный гранулометрический состав зольной части горячих сланцев к требованиям ГОСТ 16557-78 на минеральные порошки [2, 3].

Гидролизный лигнин – это отход спиртового и дрожжевого производства.

Как вещество лигнин представляет собой сложную полидисперсную систему с большим диапазоном размеров частиц. Как показали исследования, в нем содержатся частицы: размером больше 250 мкм (54–83 %), меньше 250 мкм (17–46 %), коллоидные (0,2–4,3 %).

Гидролизный лигнин может быть использован в качестве лигнино-смоляного вяжущего для дорожного строительства. Применение данного отхода сдерживается в связи с тем, что при нагреве более 300 °С из него активно выделяются токсичные вещества (в основном фенолы). Кроме того, до сих пор не найдены эффективные помольные средства для его измельчения до требуемой кондиции. Известен положительный опыт использования лигнина в качестве минерального порошка для приготовления асфальтобетонных смесей [4–6].

Отход сахарного производства (дефекат). В БНТУ были проведены исследования по применению в качестве активатора

минеральных материалов в асфальтобетоне отходов сахарного производства – дефектата. Он образуется при очистке сахарных стоков известью и представляет собой подвижную массу серого цвета, влажность которой при образовании составляет 40–50 %, а в отвалах снижается до 18–20 %.

Состав дефектата следующий, в % по массе: CaCO_3 – 74, сахар – 2; пектиновые вещества – 1,7; базальтовые вещества – 9,5; минеральные вещества – 12,8 [7]. Дефект поступает с завода на поля фильтрации.

Испытания дефектата по ГОСТ 12784-78 показали, что в нем содержится более 95 % зерен крупностью 0,071 мм и он отвечает требованиям ГОСТ 16557-78 на минеральный порошок для асфальтобетона. Доля использования дефектата не превышает сегодня 25 %. В настоящее время на территории Беларуси действуют 4 сахарных завода, где скопилось более 4 миллионов тонн дефектата. Образцы асфальтобетона, где в качестве минерального порошка использовался дефектат, имели показатели прочности при температуре +50 °С в 1,2–1,3 раза выше, чем образцы на эталонном доломитовом порошке.

Таким образом, в ходе строительства и проведения ямочного ремонта автомобильных дорог может быть использовано большое количество различного вторичного сырья. Их применение позволит снизить стоимость дорожного строительства, обеспечить экономию природных ресурсов, а самое главное – значительно повысить степень утилизации отходов.

Список литературы

1 Ковалев, Я. Н. Активационные технологии дорожных композиционных материалов (научно-практические основы) : монография / Я. Н. Ковалев. – Минск : БелЭН, 2002. – 334 с.

2 Дорожные материалы из сланцев Поволжья / Н. А. Горнаев, В. Е. Никишин, С. М. Евтеева, Л. В. Никифорова // Горючие сланцы – альтернативный источник топлива и сырья. Фундаментальные исследования. Опыт и перспективы : материалы Междунар. науч. конф. – Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2007. – С. 157 - 160.

3 Перспективы использования горячих сланцев и продуктов их термопереработки в дорожном строительстве / А. А. Морев, В. Н. Илясов, С. В. Илясов [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 3. – С. 529–532.

4 Крутов, С. М. Связующие на основе продуктов щелочной деструкции гидролизного лигнина / С. М. Крутов, И. В. Грибков, М. М. Равицкий // Древесные

плиты: теория и практика : материалы 18-й Междунар. науч.-практ. конф., 18–19 марта 2015 г. – СПб. : ЗАО Вестник «ВНИИДРЕВ», 2015. – Вып. 4 (15). – С. 9–11.

5 **Ставицкий, В. Д.** Лигнино-смоляное вяжущее / В. Д. Ставицкий // Автомобильные дороги. – 1979. – № 1. – С. 20–22.

6 **Сюньи, Г. К.** Новый минеральный порошок для асфальтобетона / Г. К. Сюньи, Т. Ю. Химерик // Автомобильные дороги. – 1979. – № 1. – С. 19–20.

7 Справочник отходов производственных предприятий Белорусской ССР, используемых для выпуска строительных материалов. Т. 1. – Минск, 1988. – 352 с.

Научное издание

КОМПОЗИТЫ
В МАШИНОСТРОЕНИИ И ТРАНСПОРТЕ

Материалы II Международной научно-практической конференции
(Гомель, 24 апреля 2025 г.)

Издается в авторской редакции

Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректор *Д. В. Марцинкевич*

Подписано в печать 30.12.2025 г. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Гарнитура Таймс. Уч.-изд. л. 3,76. Зак. № 2226. Изд. № 48.

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