МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 674.81.0182.666.189

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ И СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ

канд. техн. наук В.Я. ЩЕРБА, А.Н. ЕКИМЕНКО, канд. техн. наук С.Н. КОЛДАЕВА, В.А. РАДЕВСКИЙ, Ю.Д. ТЕРЕШКО
(Институт инновационных исследований, Гомель)

Исследуются композиционные материалы триботехнического назначения и способы изготовления изделий из них, обладающих бинарными свойствами. Представлены работы по созданию и исследованию новых материалов – древопластов композиционных армированных (ДПКА) – на основе измельченных отходов древесины (в качестве наполнителя) и отходов полиоксидиозольного, базальтового и углеродного волокон в виде путанки (в качестве армирующего элемента), выполненные В НПУП «Институт инновационных исследований» (г. Гомель). Рассмотрены методы определения адгезии связующего к армирующим волокнам, приведены составы новых конструкционных материалов и их применение в промышленности.

Введение. Основная причина ограниченного использования древесных пластиков (ДПК) в машино- и станкостроении для изготовления сложнонагруженных деталей заключается в низкой прочности этих материалов при работе на ударный изгиб [1].

Поскольку большинство машиностроительных деталей во время эксплуатации испытывает действие динамических ударов и вибрационных нагрузок, к ним предъявляются высокие требования работы на удар. К настоящему времени наметились некоторые направления по улучшению свойств ДПК путем армирования их металлом или стеклянными волокнами [2, 3].

В первом случае металлическая арматура в виде проволоки, штифтов, втулок, болтов, гаек, колец или пластин закладывается непосредственно в пресс-форму и запрессовывается в изделие во время формирования. Однако применение металлической арматуры в качестве упрочняющего средства ДПК приводит к значительному удорожанию изделий, увеличению веса и усложнению технологического процесса.

При применении металлической арматуры нарушается монолитность изделий. В деталях и конструкциях из-за различия в коэффициентах линейного расширения разнородных материалов могут возникать значительные внутренние напряжения, вызывающие трещины и коробления, которые отрицательно сказываются на работе армированных конструкций.

При армировании ДПК стеклянными волокнами наблюдается значительное улучшение физико-механических свойств, но при этом резко возрастает (в 3...4 раза) коэффициент трения, и такие изделия нельзя использовать для изготовления трущихся деталей машин. Кроме того, использование стеклянного волокна в процессе производства ДПК и при изготовлении из него деталей машин требует специальных защитных средств органов дыхания, рук, лица, так как поражает кожу и слизистую оболочку горла.

Результаты исследований и их обсуждение. Для устранения этих недостатков в Институте инновационных исследований разработан способ изготовления ударопрочных пластиков на основе древесины путем армирования их волокнистыми материалами.

При разработке этих материалов в качестве связующего использовались спиртовые растворы фенолформальдегидной смолы ЛБС-3 и кремнийорганической К-9-Б, модифицированной поливинилбутиралем.

Эти смолы обладают сравнительно высокой адгезией к древесине, полиоксидиозольным и базальтовым волокнам, выпускаются многотоннажно промышленностью и имеют невысокую стоимость.

В качестве арматуры использовались отходы полиоксидиозольных, углеродных и базальтовых волокон и нитей в виде путанки. Выбор их в качестве армирующих элементов обусловлен рядом положительных качеств, присущих этим волокнам.

Основным фактором, определяющим совместную работу составляющих системы «древесина – армирующие волокна – связующее» в монолите пластика, является адгезионная прочность связующего к армирующим волокнам.

Исследование адгезионной прочности связующего к тонким волокнам диаметром 6…10 мк осуществлялось по разработанным нами методам.

Метод А. Определение адгезии волокна со связующим за счет учета напряженно-деформированного состояния образца. Сущность способа заключается в следующем: испытываемый образец, выполненный в виде связующего и размещенного в нем волокна, нагревается до температуры T_H отверждения связующего, охлаждается до комнатной температуры со скоростью 5...20 ºС в минуту, затем к нему прикладывается нагрузка до разрушения и производится оценка прочности связующего к исследуемому волокну. Нагрузка создается охлаждением ниже комнатной температуры, измеряется разность температур нагрева T_H и охлаждения T_O, а прочность сцепления τ определяется по формуле:

$$\tau = \frac{\Delta\alpha\left(T_н - T_о\right)E_в d}{2l}\left(\frac{1}{1+\frac{E_в}{E_{св}}\frac{S_в}{S_{св}}}\right), \text{ Па}, \qquad (1)$$

где $\Delta\alpha$ – разность между коэффициентами термического расширения связующего и волокна; $E_в$, $E_{св}$ – модуль Юнга соответственно волокна и связующего; $S_в$, $S_{св}$ – площадь поперечного сечения соответственно волокна и связующего; d – диаметр волокна; l – длина волокна.

На рисунке 1 изображен испытуемый образец полиоксидиозольного волокна с эпюрой напряженно-деформированного состояния, предложенного способа при охлаждении образца до комнатной температуры (а) и ниже комнатной температуры (б).

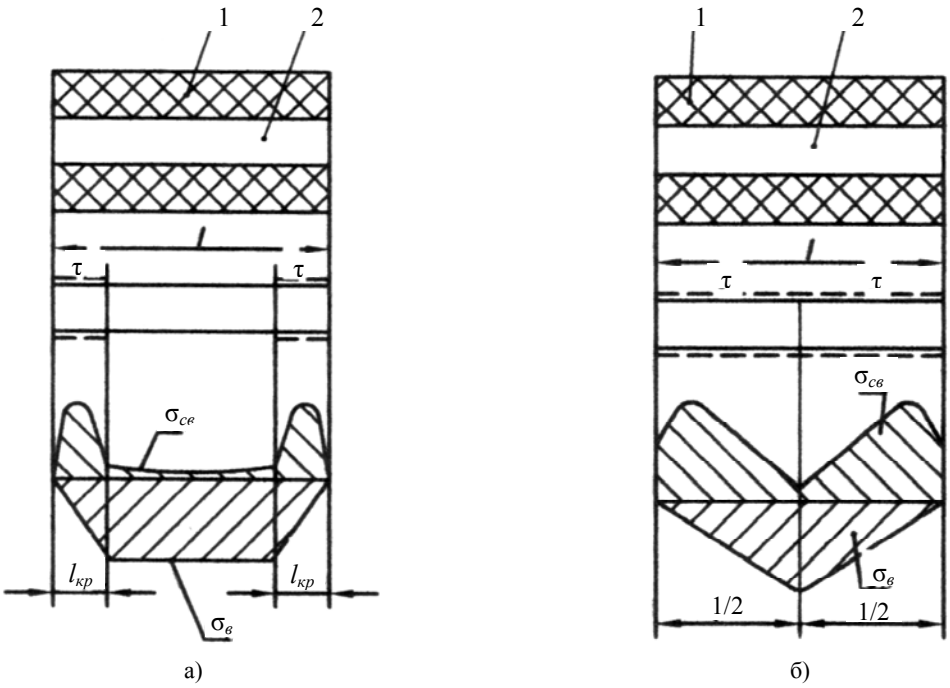


Рис. 1. Образец полиоксидиозольного волокна с эпюрой напряженно-деформированного состояния:
а – охлаждение образца до комнатной температуры; б – охлаждение образца ниже комнатной температуры;
1 – связующее; 2 – волокно; τ – прочность сцепления; $\sigma_в$ – напряжение в волокне;
$\sigma_{св}$ – напряжение в связующем; l – длина волокна

Способ определения адгезии заключается в следующем. Волокно размещают в связующем. При этом отношение диаметра волокна d к его длине l выбирают $\frac{1}{7}...\frac{1}{3}$, а площади поперечного сечения волокна к площади поперечного связующего – 0,01...0,1, так как при отношении диаметра волокна к его длине больше $\frac{1}{3}$, теряется понятие волокна как такового, а при значении, меньшем $\frac{1}{7}$, возникает неравномерность адгезионной связи по поверхности сцепления и возможно когезионное разрушение связующего или волокна.

Когда отношение площади поперечного сечения волокна $S_в$ к площади поперечного сечения связующего $S_{св}$ выше 0,1, наступает когезионное разрушение связующего прежде, чем наступит разрушение адгезионных связей, а при значении, меньшем 0,01, наступает преждевременное разрушение волокна.

Полученный образец нагревается до температуры отверждения связующего. При этом выбираются материалы волокна и связующего с различными коэффициентами α их линейного расширения и модулями Юнга *E*. Измеряется температура $T_Н$ отверждения связующего, а затем образец охлаждается со скоростью 5...20 ºС/мин. В случае охлаждения с большей скоростью наступает разрушение образца без разрушения адгезионных связей между связующим и волокном, а охлаждение с меньшей скоростью приводит к релаксации температурных напряжений в образце.

При охлаждении образца до комнатной температуры в нем возникают внутренние нормальные напряжения $G_в$ тем большие, чем больше разность термического расширения $\Delta\alpha$ между связующим и волокном. Кроме того, в образце между связующим и волокном возникают тангенциальные напряжения сдвига. В дальнейшем нагрузка на образец создается охлаждением образца ниже комнатной температуры. При этом в адгезионном слое увеличиваются тангенциальные напряжения сдвига и адгезионная связь между связующим и волокном нарушается. При этом фиксируется температура охлаждения T_O, при которой происходит разрушение образца. Измеряется разность температур нагрева $T_Н$ и охлаждения T_O и определяется прочность сцепления τ по формуле (1).

Характер разрушения и структурно-морфологические особенности соединений исследовались методом сканирующей электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе JSM-50A.

Метод Б. Исследование адгезионной прочности связующего к армирующим волокнам (метод грибков). Адгезионная прочность связующего к волокнам оценивалась по методике, схематически изображенной на рисунке 2.

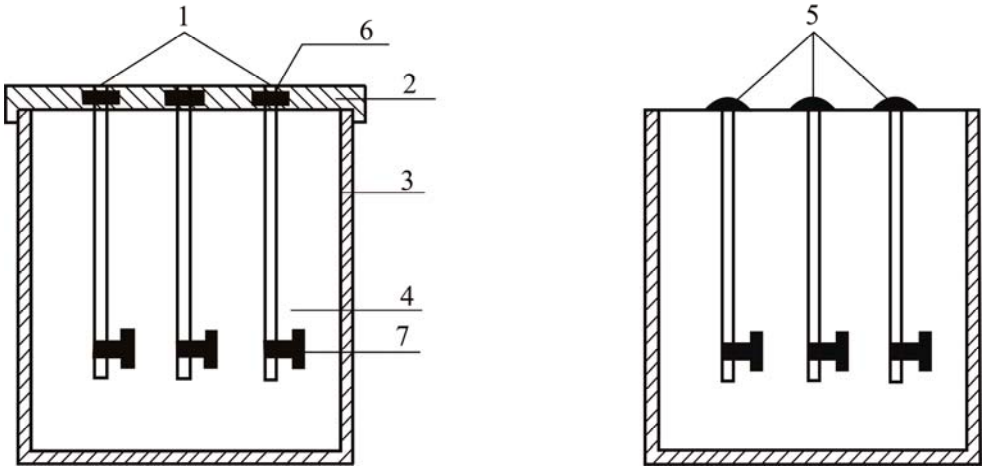


Рис. 2. Схема получения образцов для определения адгезии связующего к волокнам:
1 – волокна; 2 – фиксирующая перекладина; 3 – сосуд; 4 – легкоплавкий антиадгезионный материал;
5 – капли связующего; 6 – зажимы волокон; 7 – грузила

Сущность метода заключается в следующем. На фиксирующей перекладине *2* закреплены специальными зажимами исследуемые волокна *1*, которые затем опускаются в сосуд *3*, заполненный легкоплавким антиадгезионным материалом *4*, например, парафином и др. Чтобы волокна не всплывали, на концах их с помощью зажимов закрепляются небольшие грузила. После охлаждения материала до отверждения и снятия фиксирующей перекладины волокна обрезаются заподлицо с поверхностью антиадгезионного материала, а затем на торцевую поверхность волокон с помощью капилляра наносятся капли связующего. Образцы выдерживаются в таком состоянии до отверждения. После формирования образцов парафин расплавляется и образцы в виде «грибков» извлекаются из сосуда для определения адгезионной прочности методом нормального отрыва с помощью динамометра Шоппера.

Из-за легкоплавкости антиадгезионного материала контакт адгезива с материалом волокон осуществляется только по площадям торца волокна без затеков, т.е. происходит точечный контакт адгезива с волокном. Использование образцов, изготовленных предложенным способом, позволяет достаточно быстро и с высокой точностью определить величину адгезионной прочности связующего к волокнам, а также исключить неравномерность напряжений при испытании образцов и образование затеков адгезива на волокнах, которые неизменно приводят к искажению результатов.

Срез волокон, произведенный непосредственно в процессе изготовления образца, обеспечивает чистоту того участка волокна (торца), который вступает в контакт со связующим.

Результаты исследований адгезионной прочности связующего к армирующим волокнам приведены в таблице 1.

Очевидно, наличие на поверхности полиоксидиозольного древесного волокна (ПОДВ) текстильного замасливателя снижает прочность адгезионного взаимодействия волокна со связующим. Для количественной оценки влияния замасливателя на адгезию фаз был проведен ряд экспериментов, по результатам которых было определено допустимое содержание замасливателя на поверхности волокон.

Таблица 1

Адгезионная прочность связующего к полиоксидиозольному, углеродному и базальтовому волокнам

Наименование волокна	Связующее, адгезионная прочность, МПа		
	Смола фенолформальдегидная ЛБС-3 (ФФС)	Смола кремнийорганическая К-9-Б (КОС)	Бинарное связующее: 75 % – ЛБС; 25 % – К-9-Б
Полиоксидиозольное	19...21	20...22	22...24
Углеродное	22...24	18...19	19...20
Базальтовое	17...19	11...12	15...16

На рисунке 3 показана зависимость адгезионной прочности связующего от содержания замасливателя.

Установлено, что наличие до 0,8 % замасливателя не оказывает значительного влияния на величину адгезии. С увеличением содержания замасливателя свыше 1 % снижается адгезионная прочность связующего к ПОДВ.

При изучении процесса формирования полимерной пленки на поверхности ПОДВ микроструктурный анализ показал, что бинарное связующее сравнительно равномерно покрывает волокно, образуя при этом сплошную пленку, а кремнийорганическая смола при импрегнировании ПОДВ сосредотачивается на его поверхности в виде отдельных образований.

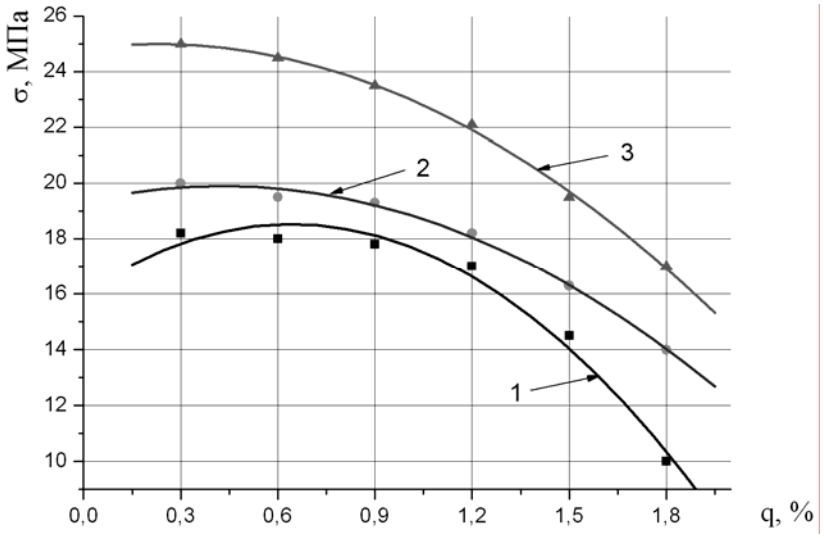
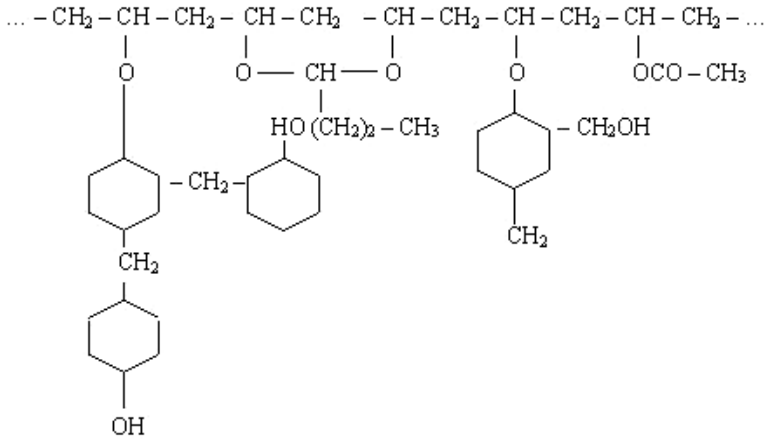


Рис. 3. Зависимость адгезионной прочности ПОДВ к связующему от содержания замасливателя:
σ – адгезионная прочность, МПа; *q* – содержание замасливателя, %; 1 – кремнийорганическая смола К-9-Б;
2 – фенолформальдегидная смола ЛБС-3; 3 – бинарное связующее (75 % ЛБС-3 и 25 % К-9-Б)

Анализ результатов исследований показал, что адгезионная прочность бинарного связующего несколько выше, чем у ФФС, и значительно выше, чем у КОС. Это объясняется процессом отверждения данных смол, где возможно протекание следующих реакций:

- взаимодействие молекул поливинилового спирта с молекулами резольной смолы;
- реакция метилольных групп резольных смол с атомами водорода фенольных ядер. В результате этих реакций происходит образование сетчатой структуры за счет сшивания молекул резольной смолы молекулами поливинилового спирта.

При взаимодействии поливинилового спирта и фенольно-формальдегидного полимера в результате реакции поликонденсации образуется структура, содержащая функциональные полярные группы –OH, OCO – CH_3 и имеющая следующее строение:



Новые составы композиционных материалов. Исследования влияния вида и содержания в композиции связующего и армирующих материалов, а также адгезии фенолформальдегидной и кремнийорганической смол к базальтовому, полиоксидиозольному и углеродному волокнам на механическую прочность материала позволили разработать новые конструкционные и антифрикционные материалы, рецептурный состав которых приведен в таблице 2, а физико-механические свойства – в таблице 3.

Таблица 2

Рецептурный состав новых конструкционных материалов

Наименование компонента	Содержание, вес. %	
	АДПК (антифрикционный древопласт)	КБУП-1 (конструкционный базальтоуглепласт)
Измельченная древесина	35,5...51,5	–
Базальтовое волокно	–	53,05...68,35
Полиоксидиозольное волокно	10...15	–
Углеродное волокно	5...8	2...5
Фенолформальдегидная смола ЛБС-3	27	–
Фенолформальдегидная смола СФ-342А, модифицированная поливинилацеталем	–	22...25
Кремнийорганическая смола К-9-Б	–	1...5
Базальт плавленый	–	2...4
Окись кальция	–	0,5...2,5
Антистатик – алкамон	–	0,15...0,45
Графит кристаллический	–	2...5
Синтетический латекс	1..3	–
Диметилтетрахлортерефталат	0,7...2,4	–
Стеарат цинка	1,1...2,5	–
Графит	3,4...5,9	–
Йодистый кадмий	0,3...0,7	–

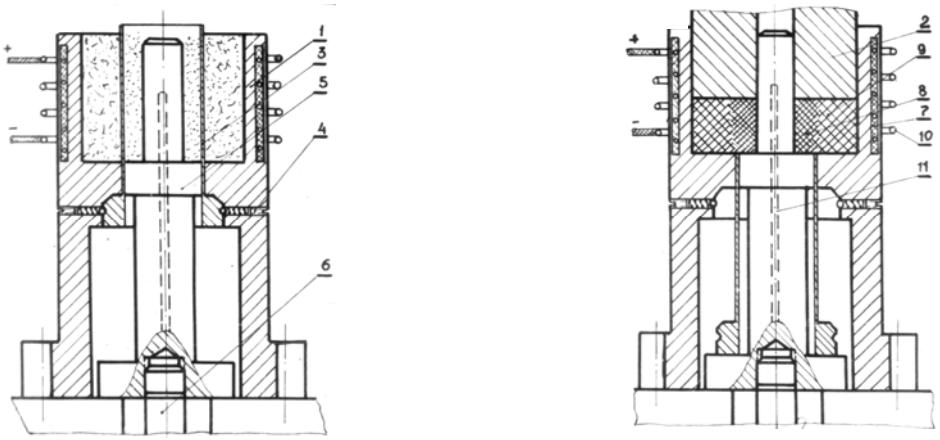
Изготовление изделий из вышеуказанных материалов производится методом прямого прессования при температуре 160...170 ºС, давлении 50...70 МПа, времени выдержки под давлением 0,8...1,0 мин на 1 мм толщины изделия.

Таблица 3

Физико-механические свойства новых конструкционных материалов

Наименование показателя	АДПК (антифрикционный древопласт)	КБУП-1 (конструкционный базальто-углепласт)
Плотность, кг/м^3	1400...1450	1600...1700
Ударная вязкость, кДж/м^2	19...21	30...35
Предел прочности, МН/м^2:		
- при растяжении	60...70	105...115
- при сжатии	150...160	180...190
- при статическом изгибе	110...120	135...150
Текучесть по Рашигу, мм	90...110	55...70
Теплостойкость по Мартену, ºС	200...210	250...260
Коэффициент трения	0,06...0,08	0,6...0,8
Горючесть:		
- потеря массы образца при горении, %	8,9...9,2	3,1...6,8
- время самостоятельного горения (тления), с	65...75	34...42

Способы изготовления изделий. С целью расширения области использования ДПКА, как конструкционного материала, для изготовления не только корпусных изделий, но и деталей трения (подшипники скольжения, муфты свободного хода, зубчатые колеса и др.) нами были разработаны способ и необходимая оснастка для изготовления опор скольжения из двух различных пресс-материалов, обладающих различными физико-механическими и триботехническими свойствами и общей технологической основой. Особенностью этого способа является одновременное формирование корпуса опоры скольжения, имеющего сложную геометрическую форму из одного пресс-материала, а подшипника скольжения – из другого. Формирование изделия осуществлялось за один технологический прием с помощью специальной конструкции оснастки, приведенной на рисунке 4.



а) б)

Рис. 4. Устройство для изготовления изделий из разнородных пресс-композиций:
а – вид устройства при загрузке материала; б – вид при прессовании;
1 – корпус; 2 – пуансон; 3 – разделяющая перегородка; 4 – пружинные фиксаторы; 5 – матрица;
6 – выталкиватель; 7, 10 – нагревательные элементы; 11 – термопара

Формование изделия с помощью устройства осуществляется следующим образом. При движении выталкивателя вверх поднимается матрица *5*, которая передвигает в верхнее положение разделяющую перегородку *3* до упора, где последняя фиксируется пружинными фиксаторами *4*. После этого выталкиватель пресса и закрепленную на нем матрицу со стержнем опускают в нижнее положение. Этим достигается создание двух загрузочных камер, куда загружаются различные по составу композиции.

После загрузки обеих камер производится прессование. При движении пуансона *2* вниз происходит нажатие на выступающую над корпусом разделяющую перегородку *3*, после чего она освобождается от фиксаторов *4* и под действием собственного веса опускается в крайнее нижнее положение (рис. 4, б). При дальнейшем движении пуансона происходит прессование изделия.

Изготовленные с помощью данного устройства корпус муфты свободного хода кормоуборочного комбайна и корпус звездочки привода мотовила (рис. 5, 6) подшипника ролика ленточного конвейера обладают бинарными свойствами, присущими каждому из применяемых материалов.

Эксплуатационные испытания деталей машин из ДПКА. Разработанные нами материалы и способы изготовления изделий из них были всесторонне исследованы в лабораторных и производственных условиях.

На рисунках 5 и 6 приведены корпус муфты свободного хода и корпус звездочки привода мотовила кормоуборочного комбайна, изготовленные из ДПКА совмещенным методом из двух пресс-материалов одновременно за один технологический прием. При этом корпус изделия (зона а) изготавливался из ДПКА, а зона трения б – из антифрикционного материала. Изготовленные таким образом изделия обладают свойствами, присущими каждому из применяемых пресс-композиций.

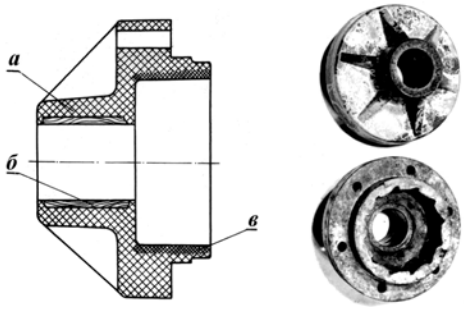


Рис. 5. Корпус муфты свободного хода кормоуборочного комбайна: а – корпус; б – подшипник скольжения; в – зубчатый элемент

Рис. 6. Корпус звездочки привода мотовила: а – из ДПКА; б – металлический

Изготовленные изделия эксплуатировались в полевых условиях при уборке кукурузы и трав на силос, где показали высокую надежность и работоспособность. На рисунке 7 показан узел рессорного подвешивания тепловоза марки 2П-10У с фрикционными накладками из композиционного материала на основе базальтового волокна и фенолформальдегидной смолы.

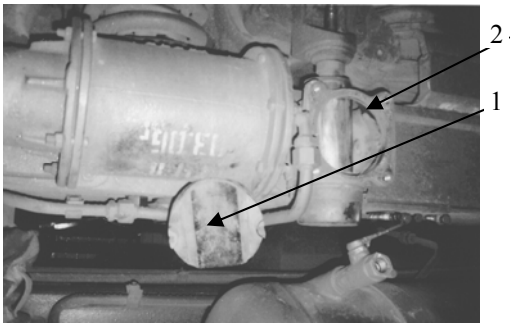


Рис. 7. Узел рессорного подвешивания тепловоза марки 2П-10У: 1 – фрикционная накладка; 2 – узел рессорного подвешивания

В настоящее время на РУП «Гомсельмаш» выпускается 6 наименований машин с деталями из ДПКА. Только в 2007 году от использования разработанных нами материалов получен экономический эффект свыше 120 млн. руб.

Заключение. Проведенные испытания показали высокую работоспособность накладок. Результаты исследований внедрены в производство. В настоящее время в опытном производстве Солигорского института проблем ресурсосбережения организовано массовое производство фрикционных накладок для ремонта узлов рессорного подвешивания тепловозов марки 2П-10У на Гомельском, Жлобинском и Витебском локомотивном депо. Внедрение фрикционных накладок на основе базальтового волокна позволило в 2 раза увеличить срок их службы и получить экономический эффект 46 млн. руб.

Выводы. Разработаны способы определения адгезионной прочности связующего к тонким волокнам диаметром 6...10 мкм. На основе использования измельченных отходов древесины, полиоксидиозольных, углеродных и базальтовых волокон – новые материалы триботехнического назначения, а также способ и технологическая оснастка для изготовления опор скольжения из ДПКА, обладающих бинарными свойствами. Проведены лабораторные и эксплуатационные испытания деталей трения из новых материалов и организовано их внедрение в производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нысенко, Н.Т. Древесные пластики / Н.Т. Нысенко. – М.: Лесная промышленность, 1976.
2. Колдаева, С.Н. Конструкционные коррозионно-стойкие пластики на основе древесины и стекловолокна с повышенными антифрикционностью и огнестойкостью: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Колдаева. – Новополоцк: ПГУ, 2005.
3. Вигдорович, А.И. Применение древопластиков в машиностроении: справ. пособие / А.И. Вигдорович, Г.В. Сагалаев. – М.: Машиностроение, 1977.

Поступила 14.07.2007