

Таблица 6
Проверка адекватности уравнения регрессии
на двигателях, не участвовавших
в процессе численного эксперимента

Авиационный двигатель	$\overline{Re s_{K\text{Спракт}}}$	$\overline{Re s_{K\text{Стеор}}}$
ТВ3-117ВМ	0,15	0,253
ТВ3-117КМ	0,15	0,306
ТВ3-117В	0,15	0,272
ТВ3-117ВК	0,15	0,234
ARRIEL 2В	0,30	0,339
ARRIEL 1D1	0,40	0,332
ARRIEL 1С2	0,30	0,294

Средние значения $\overline{Re s_{K\text{Спракт}}}$ и $\overline{Re s_{K\text{Стеор}}}$ табл. 6 соответственно равны 0,228 и 0,29.

ВЫВОД

Как видно из приведенных примеров, эмпирическая зависимость (5) пригодна для расчета ресурса камеры сгорания авиационного двигателя с определенной степенью точности. Значения ресурса, рассчитанного с помощью полученной зависимости, как видно из табл. 6, на 0,062 единиц больше ресурса, опираясь на который эксплуатируются авиационные двигатели на сегодняшний день. В абсолютных величинах это составляет 620 ч налета. То есть двигатель с данной камерой сгорания может эксплуатироваться еще порядка трех лет, а он

преждевременно отправляется в ремонт или на свалку, что влечет за собой громадные дополнительные материальные затраты.

С помощью полученного уравнения регрессии можно также решать задачи по определению недостающих параметров зарубежных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акимов, В. М.** Основы надежности газотурбинных двигателей / В. М. Акимов. – М., 1981.
2. **Гнеденко, Б. В.** Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М., 1965.
3. **Лозицкий, Л. П.** Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей / Л. П. Лозицкий, А. Н. Ветров, С. М. Дорошко. – М., 1992.
4. **Штода, А. В.** Конструкция авиационных газотурбинных двигателей / А. В. Штода, В. А. Секистов, В. В. Кулешов. – Киев, 1982.
5. **Гнеденко, Б. В.** Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. – М., 1996.
6. **Большев, Л. Н.** Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М., 1965.
7. **Акимов, В. М.** Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / В. М. Акимов [и др.]. – М., 1987.
8. **Коровкин, В. Д.** // Труды V научных чтений по космонавтике, посвященных памяти выдающихся советских ученых – пионеров освоения космического пространства / В. Д. Коровкин, М. М. Цховребов. – М., 1983. – С. 45–47.

Поступила 15.11.2005

УДК 621.85.052.44

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АДГЕЗИИ КОМПОНЕНТОВ ПРИВОДНЫХ ЗУБЧАТЫХ РЕМНЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ РЕСУРС

Канд. техн. наук, доц. **БАХАНОВИЧ А. Г.**

Белорусский национальный технический университет

Приводной зубчатый ремень является вязкоупругой полимерной анизотропной системой элементов, взаимосвязанных посредством адгезионных связей (рис. 1). Для обеспечения прочности связи используют адгезионные компоненты, основными составляющими которых являются синтетические смолы.

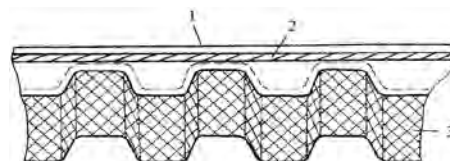


Рис. 1. Зубчатый ремень: 1 – наполнитель; 2 – несущий слой; 3 – износостойкая тканевая обкладка

Количественной характеристикой адгезии служит работа, затрачиваемая на разрушение адгезионного соединения [1]:

$$A_{ад} = p_{п} + \gamma_{ж}(k + \cos\varphi), \quad (1)$$

где $p_{п} = \gamma_{т} - \gamma'_{т}$ – поверхностное давление пленки адсорбированных на твердом теле паров; $\gamma_{т}$ – поверхностная энергия твердого тела; $\gamma'_{т}$ – свободная поверхностная энергия твердого тела в атмосфере паров или газов; $\gamma_{ж}$ – поверхностное натяжение жидкости; $k = \gamma'_{ж} / \gamma_{ж}$; $\gamma'_{т}$ – поверхностное натяжение жидкости, ориентированной под влиянием силового поля твердой поверхности; φ – угол смачивания.

Из (1) следует, что для достижения высокой адгезии необходимо, чтобы $p_{п}$ имело высокие значения, а также выполнялось условие $\gamma_{т} > \gamma_{ж}$, обеспечивающее смачивание адгезивов поверхности субстрата. Можно считать, что для достижения высокой адгезии необходимо выполнение условия

$$\gamma_{субстрат} > \gamma_{адгезив}. \quad (2)$$

Все твердые тела – субстраты – по значениям поверхностной энергии можно условно разделить на два класса:

- с низкой поверхностной энергией ($\gamma \leq 0,1$ Дж/м²);
- с высокой поверхностной энергией ($\gamma > 0,2$ Дж/м²).

К первому относятся полимерные материалы, ко второму – стекло, металлы.

Абсолютное значение величины адгезии зависит от интенсивности межмолекулярного и химического взаимодействия в зоне контакта. Межмолекулярное взаимодействие (ван-дер-ваальсовы и дисперсионные силы) проявляется на расстоянии 5 Å и менее.

Поэтому для достижения высокого значения адгезионной прочности в реальных системах большое значение имеет также ряд других факторов. Вязкоэластические характеристики адгезива определяют способность к заполнению трещин, шероховатостей и прочих микродефектов на поверхности субстрата. Смачиваемость дублируемых материалов создает плотный контакт и необходимые предпосылки для

межмолекулярного взаимодействия. Вследствие диффузии молекул дублируемых полимерных материалов и низкомолекулярных веществ, входящих в состав полимерных композиций, образуется переходный слой, который способствует повышению адгезионной прочности. Прочность сцепления двух разнородных материалов зависит как от поверхностных сил, так и от физико-механических характеристик переходного слоя.

Критическое поверхностное натяжение большинства синтетических смол несколько выше соответствующих величин различных каучуков, поэтому введение смолы в резиновую смесь незначительно изменяет ее поверхностное натяжение на границе с воздухом. Однако наличие функциональных групп в молекулах смол обуславливает их поверхностно-активные свойства и существенно снижает поверхностное натяжение на границе резиновой смеси с твердыми телами с высокой поверхностной энергией. Введение синтетических смол в резиновые смеси повышает их адгезию к стеклу, металлам за счет улучшения смачивания. Наибольший эффект оказывают эпоксидные, резорцино- и фенолоформальдегидные, а также другие смолы с функциональными группами. После достижения необходимой степени контакта решающее значение имеет межмолекулярное и химическое взаимодействие молекул адгезива и субстрата. При этом существенную роль играет тип функциональных групп в синтетических смолах, которые вводятся в состав адгезивов.

К функциональным группам, способным к взаимодействию с самыми различными материалами, относятся эпоксидная и метилольная (СН₂ОН). Высокой реакционной способностью обладают также аминные (СН₂-Н₂) и азометиновые группы (СН₂-Н=СН₂). Указанные группы образуют различные (от водородных до химических) связи между адгезивом и субстратом. В то же время наличие функциональных групп в молекулах смол способствует их взаимодействию с молекулами каучуков.

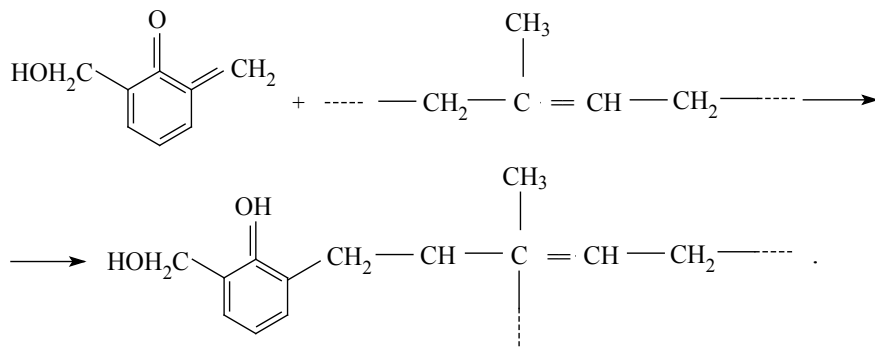
Одним из основных факторов, определяющих прочность связи между компонентами приводного зубчатого ремня, является рецептура адгезива. Адгезив, соединяющий два разнородных субстрата в монолитную структуру,

должен обладать бифильностью, т. е. иметь высокую адгезию к волокнам и резине. Наиболее широко применяются адгезивы, представляющие собой пропиточные составы на основе латексов различных каучуков. Вторым компонентом в пропиточном составе являются соединения с активными полярными группами. Большее значение имеет также тип латекса, применяемого в качестве основы адгезива. Эффективным средством воздействия на прочность связи в резинокордной системе является подбор оптимальной рецептуры резиновой смеси.

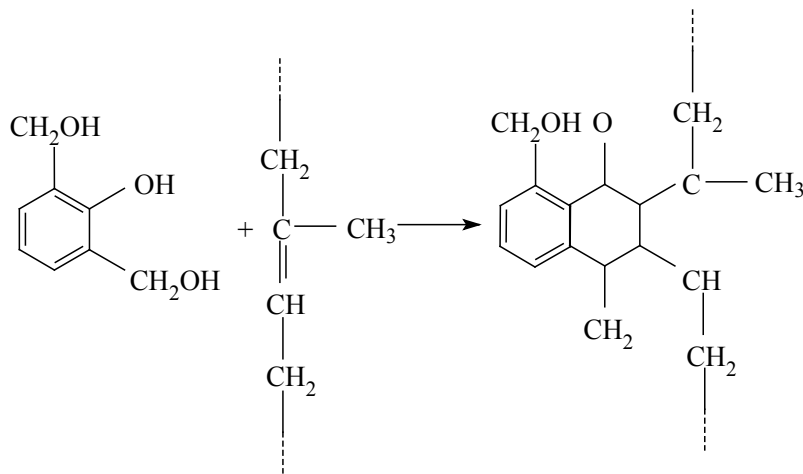
Термодинамическое совмещение эластомеров пропиточного состава и резиновой смеси положительно влияет на прочность связи на границе «адгезив – резина». Способность смолы к дальнейшей конденсации в процессе вулканизации изделия с образованием химических связей и усилением переходного слоя также повышает прочность адгезии. Для увеличения общей работоспособности системы большое

значение имеют модуль упругости, прочность и сопротивление усталости поверхностной пленки адгезива. Указанным требованиям в наибольшей степени отвечают карбоксилатные, винилпиридиновые, метакриламидные и эпосидированные каучуки.

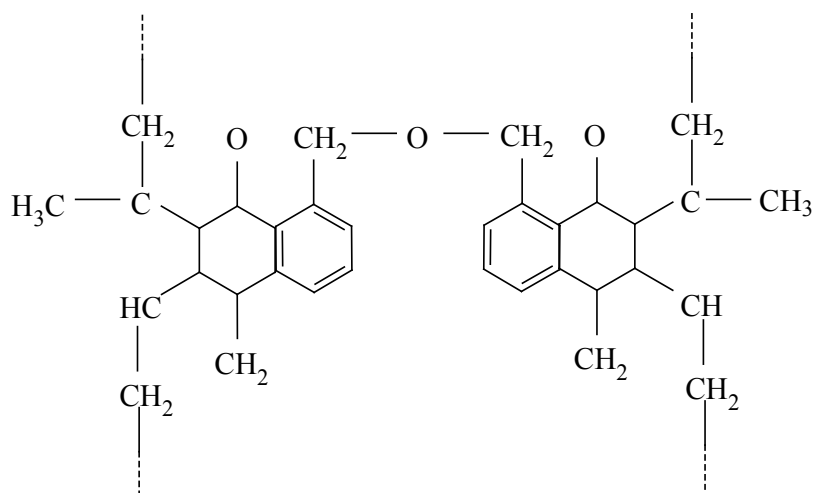
Наиболее высокие показатели адгезии дают олигомеры, полученные в соотношении резорцин:формальдегид = 1:3. Катализатором процесса являются щелочь и аммиак, pH среды поддерживается в строго заданных условиях. Конденсация смолы до введения ее в латекс обрывается на стадии образования фенолоспиртов. Механизм взаимодействия конденсационных смол с эластомерами происходит по нескольким направлениям [2]. Например, фенолоспирт с отщеплением воды превращается в хинонметид, который взаимодействует с атомами водорода CH_3 – метильных групп ненасыщенных эластомеров и сшивает макромолекулы



Другой возможный механизм – при взаимодействии фенолоспиртов с ненасыщенными соединениями образуются хромановые соединения



Конечный продукт соединения можно представить следующей формулой:



Введение резотропина приводит также к изменению ряда физико-механических показателей вулканизатов. Повышаются модуль упругости и эластичность, улучшается сопротивление тепловому старению. Одновременно понижается разрывное удлинение и снижается выносливость при многократном растяжении. Оптимальное содержание резотропина в смеси – 3–5 мас. доли. Наличие в смеси минеральных наполнителей способствует более эффективному повышению прочности связи и распределению резотропина. Резотропин обладает недостаточной стойкостью при длительном хранении. Гранулированный модификатор РУ-1, полученный из резорцина, уротропина в присутствии борной кислоты, способен обеспечивать высокую прочность связи различных резин со стекло- и металлокордом. С модификатором РУ-1 в резинокордной системе получается более высокая динамическая прочность связи и термоокислительная устойчивость резин, чем с резотропином.

При адгезии полимера к металлу роль химической природы адгезива оказывается решающей. Причем важно, чтобы адгезив не просто содержал определенное число полярных групп, а чтобы эти группы обладали способностью вступать в интенсивное взаимодействие с поверхностными группами субстрата, например исполняли роль доноров электронов. Между атомами металла и углеводородами в системе «адгезив – субстрат» могут образовываться химические связи. Например, между углеводородом и металлом может возникнуть ковалентная связь.

Несмотря на возможность химического взаимодействия между металлом и углеводородами значительно больший интерес для адгезионных систем представляет механизм взаимодействия полимерных адгезивов с окисной пленкой, образующейся практически на любой металлической поверхности. Покрывающие поверхность металлов окисные пленки играют существенную роль в адгезии. Причина высокой прочности связи резины с латунированным металлокордом состоит в химическом взаимодействии между активным компонентом меди и серой. Цинк играет роль наполнителя. Существенное значение имеют составы латуни и резины, при изменении которых изменяются относительные скорости взаимодействия серы с латунью и каучуком. Высокая прочность связи достигается только в том случае, когда эти скорости соизмеримы. Взаимодействие серы с латунью приводит к образованию сульфида меди CuSO_3 , который препятствует образованию связи латуни с каучуком, а быстрая реакция серы с каучуком вызывает вулканизацию резиновой смеси раньше, чем успеет образоваться достаточное число связей между каучуком и латунью [3]. Образовавшийся в начальный период сульфид меди, обнаруженный на поверхности латуни после отделения от нее резины, связывается затем с молекулами каучука через атом серы.

Для повышения прочности связи в системе «эластомер – стеклокорд» используют различные типы аппретов – комплексные соединения солей хрома, кобальта, меди и свинца или меркаптансодержащие кремнийорганические аппреты.

Таблица 1

**Резиновая смесь для слоя сжатия и растяжения
(образец 1)**

Наименование компонента	1 мас. доля на 100 мас. дол. каучука
Наирит ДСР	70,0
СКН-18М	30,0
Тиурам	0,25
Белила цинковые	3,0
Магнезия жженая	7,0
Нафтам-2	2,0
Смола стирольная инденовая	5,0
Технический углерод Т-900	40,0
Технический углерод П-701	50,0
Стеарин	1,0
Дибутилфталат	20,0
Фталевый ангидрид	1,0
Итого	229,25
Теоретическая плотность, кг/м ³	1400

Таблица 2

**Резиновая смесь для слоя сжатия и растяжения
(образец 2)**

Наименование компонента	1 мас. доля на 100 мас. дол. каучука
Наирит	85,0
СКД	10,0
СКН-3	5,0
Технический углерод П-701	70,0
Сажка белая БС-100	5,0
Вискозное волокно	10,0
Белила цинковые	3,0
Магнезия жженая	7,0
Тиазол	1,0
Дибутилфталат	10,0
Пластификатор ПН-6Т	15,0
Нафтам-2	2,0
Диафен ФП	1,0
Паралайт 17	1,0
Стеарин	2,0
Модификатор РУ	1,2
Октофор	1,2
Итого	229,4
Теоретическая плотность, кг/м ³	1430

Таблица 3

**Резиновая смесь для слоя сжатия и растяжения
(образец 3)**

Наименование компонента	1 мас. доля на 100 мас. дол. каучука
Неопрен	70,0
СКН-18М	30,0
Технический углерод П-701	70,0
Технический углерод Т-900	30,0
Сера	2,5

Оптимальное содержание активных групп в адгезиве подбирают, как правило, эмпирически, так как в основном отсутствует пропорциональность между адгезионной прочностью и содержанием в адгезиве функциональных групп. Эта зависимость часто имеет экстремальный характер. С увеличением содержания функциональных групп адгезионная прочность, достигнув определенного предела, перестает возрастать и даже начинает снижаться [4].

Для создания прочного резинокордного каркаса применяются бифильные адгезивы (пропиточные составы), которые имеют высокую адгезию к полимерам волокон и слабополярным эластомерам, входящим в состав резиновой смеси. Наличие у адгезива и субстрата групп, способных к образованию водородных связей, комплексов с переносом зарядов, ион-дипольных и других взаимодействий, еще не означает, что в этой системе может быть легко достигнута высокая адгезионная прочность. Число функциональных групп адгезива и субстрата, вступивших во взаимодействие, лишь косвенным образом связано с их общим количеством [5]. В большинстве случаев значительная часть функциональных групп на поверхности раздела «адгезив – субстрат» не участвует во взаимодействии.

Таким образом, вопрос о взаимодействии функциональных групп адгезивов с соответствующими группами поверхности субстратов достаточно сложный и требует индивидуального подхода к решению. Необходимо учитывать не только наличие и тип функциональных групп в макромолекулах адгезива, но и пространственное строение полимера, длину и гибкость макромолекул, характер и прочность надмолекулярных соединений.

Функциональные группы контактирующих фаз, с точки зрения их вклада в адгезионную прочность, неравноценны. Предпочтение следует отдавать полярным группам с подвижным атомом водорода или легко реагирующими с группами, содержащими подвижный атом водорода, а также группам, имеющим гетероатомы с необобщенными электронами.

В табл. 1–4 приведены разработанные рецептуры резиновых смесей, используемых при производстве приводных зубчатых ремней.

Окончание табл. 3

Наименование компонента	1 мас. доля на 100 мас. дол. каучука
Сульфенамид Ц	1,5
Белила цинковые	3,0
Магнезия жженая	7,0
Тиазол	0,5
Нафтам-2	2,0
Фталевый ангидрид	1,0
Стеарин	2,0
Дибутилфталат	15,0
Пластификатор ПН-6	5,0
Итого	239,5
Теоретическая плотность, кг/м ³	1400

Таблица 4

Резиновая смесь для слоя сжатия и растяжения
(образец 4)

Наименование компонента	1 мас. доля на 100 мас. дол. каучука
Неопрен	100,0
Сажа белая БС-100	12,0
Технический углерод П-514	15,0
Технический углерод Т-702	15,0
Хлопковый линт	20,0
Структол	6,0
Белила цинковые	2,5
Магнезия жженая	4,0
Диафен ФП	1,0
П-оксинеозон	2,0
Эмулан	2,0
Кислота стеариновая	1,5
Паралайт 17	2,0
Пластификатор ПН-6	16,0
Октофор	2,0
Инденкумаронозная смола	3,0
Итого	204,0
Теоретическая плотность, кг/м ³	1330

В табл. 5 приведены физико-механические свойства вулканизатов.

Таблица 5

Физико-механические свойства вулканизатов

Образец	Твердость по Шору А, у. д.	Условный предел прочности при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Гистерезисные потери, %	Сопротивление на раздир, МПа	Эластичность по отскоку, %
1	65–75	12,7	370	21	3,9	36
2	65–70	11,7	320	20,3	1,5	60
3	70–80	13,0	260	20,5	3,3	30
4	70–80	9,0	290	34	5,0	30

Разработанные резиновые смеси и пропиточные составы использованы при производстве опытной партии приводных зубчатых ремней, прошедших ресурсные испытания в заводских условиях. Установлено повышение долговечности ремней в среднем на 10–15 % при сопоставимой себестоимости.

ВЫВОДЫ

1. Разработка физико-химических основ образования адгезионных связей компонентов приводных зубчатых ремней является эффективным средством повышения их несущей способности и долговечности.

2. Использование разработанных рецептур резиновых смесей и пропиточных составов при производстве приводных зубчатых ремней позволило увеличить их эксплуатационный ресурс на 10–15 %, сохраняя прежний уровень себестоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукомская, А. И. Основы прогнозирования механического поведения каучуков и резин / А. И. Лукомская, В. Ф. Евстратов. – М.: Химия, 1975. – 360 с.
2. Берлин, А. А. Основы адгезии полимеров / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – М.: Химия, 1969. – 320 с.
3. Кошелев, Ф. Ф. Общая технология резины / Ф. Ф. Кошелев, А. Е. Корнев, А. М. Буканов. – М.: Химия, 1978. – 528 с.
4. Резниковский, М. М. Механические испытания каучука и резины / М. М. Резниковский, А. И. Лукомская. – М.: Химия, 1968. – 500 с.
5. Белозеров, Н. В. Технология резины / Н. В. Белозеров. – М.: Химия, 1979. – 472 с.

Поступила 27.09.2006