

УДК 674.81.666.189

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ РУБЛЕННЫМ СТЕКЛОВОЛОКНОМ

*канд. техн. наук С.Н. КОЛДАЕВА; А.Н. ЕКИМЕНКО, Ю.Н. КОЛДАЕВ
(Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь)*

Описан способ повышения адгезии фенолформальдегидной смолы к стекловолокну, позволяющий увеличить верхний предел диапазона допустимых длин волокон, снизить уровень остаточных напряжений при термоусадке и эффект «охрупчивания» полимерной матрицы в присутствии жесткого волокна. Способ позволяет существенно повысить механические характеристики армированных пластиков - предел прочности при статическом изгибе на 30 %, ударную вязкость на 20 %.

Использование пластиков в качестве конструкционных материалов предъявляет повышенные требования к их механической прочности. Для повышения предела прочности на статический и ударный изгиб применяют армирование полимерной матрицы высокомодульными волокнами. При этом наибольший упрочняющий эффект обеспечивает армирование непрерывным волокном.

Если адгезионная прочность связующего к наполнителю достаточно велика и сравнима с когезионной прочностью матрицы, то в однонаправленном волокнистом композите, армированном непрерывными волокнами, к которому приложено растягивающее напряжение ϵ_c в направлении армирования, напряжение между матрицей и волокном распределится следующим образом [1]:

$$\sigma_c = E_m(1 - \alpha)\epsilon_c + E_f\alpha\epsilon_c, \tag{1}$$

где E_m и E_f – модули упругости матрицы и волокна, соответственно; ϵ_c – относительное удлинение при растяжении композита; α – концентрация волокна в композите.

Поскольку выбранные допущения исключают расслоение композита по границам раздела фаз, относительное удлинение ϵ_c будет общим для обеих фаз композита.

Для армирования используются, как правило, высокомодульные волокна, т.е. $E_f \gg E_m$, поэтому при $\alpha \approx 1/2$ доля напряжения, передаваемого волокнам, будет пропорциональна величине E_f/E_m .

Использование композитов, армированных непрерывным волокном, ограничено недостаточной технологичностью и достаточно высокой себестоимостью таких материалов. Применение в качестве армирующего элемента рубленого волокна позволяет использовать отходы производства, что значительно снижает себестоимость композитов.

В случае если волокнистый композит армирован однонаправленным рубленным волокном, имеет место распределение напряжения по длине волокон из-за наличия концевой эффекта. Схематически это распределение представлено на рис. 1.

Рассмотрим концевой отрезок волокна длиной x . Уравнение механического равновесия для этого отрезка:

$$\sigma_x S = \int_0^x \tau(x) 2\pi R dx + \sigma_m S, \tag{2}$$

где S – площадь поперечного сечения; R – радиус; L – длина волокна; $\sigma_x S$ – растягивающая нагрузка, передаваемая на рассматриваемый

отрезок волокна остальной его частью; $\int_0^x \tau(x) 2\pi R dx$ – часть растягивающей нагрузки, передаваемая касательными напряжениями от матрицы на боковую поверхность во-

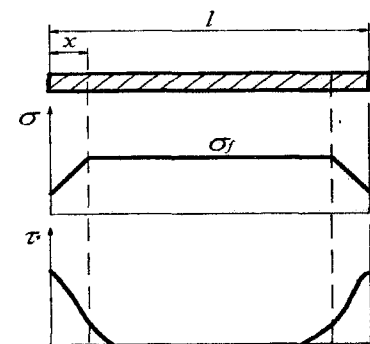


Рис. 1. Эпюры растягивающих (σ) и сдвиговых (τ) напряжений в волокне конечной длины

лопка на границе раздела фаз; $\sigma_m S$ – часть растягивающих напряжений, передаваемых от матрицы нормальными напряжениями на торцевую часть волокна.

Напряжение растяжения в волокне постепенно нарастает при движении от концов к середине. Если волокно достаточно тонкое и длинное, площадь боковой поверхности будет значительно превосходить площадь поперечного сечения волокна. В этом случае при достаточном удалении от конца волокна вторым слагаемым в уравнении (2) можно пренебречь. Длину концевой отрезка, при которой допустимо такое приближение, будем считать критической (l_c). При $x > l_c$ нагрузка, передаваемая на дискретное волокно, становится максимальной.

Таким образом, эффективная длина работающего (участвующего в перераспределении нагрузки) волокна снижается на величину l_c . Чем меньше длина дискретного волокна, тем меньше доля эффективно работающего волокна. Поскольку короткое волокно не будет работать в полной мере, армирующий эффект от введения такого волокна будет снижаться. При переходе к порошкообразному наполнителю ($l = d$) эффективность армирования настолько снижается, что его вклад в увеличение прочности начинает конкурировать со снижением прочности матрицы из-за неравномерности напряжений, возникающих в нагруженной матрице в присутствии частиц наполнителя. В результате прочность композита может даже снижаться по сравнению с прочностью матрицы. Таким образом, при армировании матрицы жестким волокном ($E \gg E_m$) армирующий эффект должен быть тем выше, чем больше длина волокон. Тем не менее экспериментальный анализ зависимости механических характеристик армированных пластиков от длины армирующих волокон позволяет сделать вывод о наличии диапазона оптимальных длин волокон, при котором обеспечивается наилучший армирующий эффект. Это в первую очередь связано с наличием в волокне дефектов, концентрация которых растет с ростом длины волокон. Оптимальная длина волокна составляет 15..20 мм [2].

Ограничение верхнего предела диапазона допустимых длин, очевидно, сдерживает возможность регулирования механических характеристик армированных пластиков. Нами исследованы способы повышения адгезионной прочности полимерного адгезива к минеральному субстрату и влияние адгезионной прочности на оптимальную длину волокон. Исследовалась возможность увеличения адгезионного взаимодействия стекловолокна с фенолоформальдегидной смолой (ФФС) за счет формирования на поверхности стекловолокна эластичной пленки поливинилбутирала (ПВБ) [3].

Установлено, что наилучший эффект достигается при введении ПВБ непосредственно в связующее, при этом в качестве связующего рекомендуется использовать олигомер резолюной фенолформальдегидной смолы Р-2. Адгезионная прочность зависит от типа промежуточной прослойки и ее толщины, а также однородности слоя эластомера на поверхности волокна.

Наилучшие показатели достигаются при формировании на поверхности стекловолокна пленки поливинилбутирала толщиной 1,5...3,5 мкм, что достигается введением в связующее 5 % спиртового раствора ПВБ. На рис. 2 представлены результаты проведенной серии экспериментов по определению диапазона оптимальных длин волокон в композиционных материалах на ФФС - связующем при использовании описанного способа аппретирования.

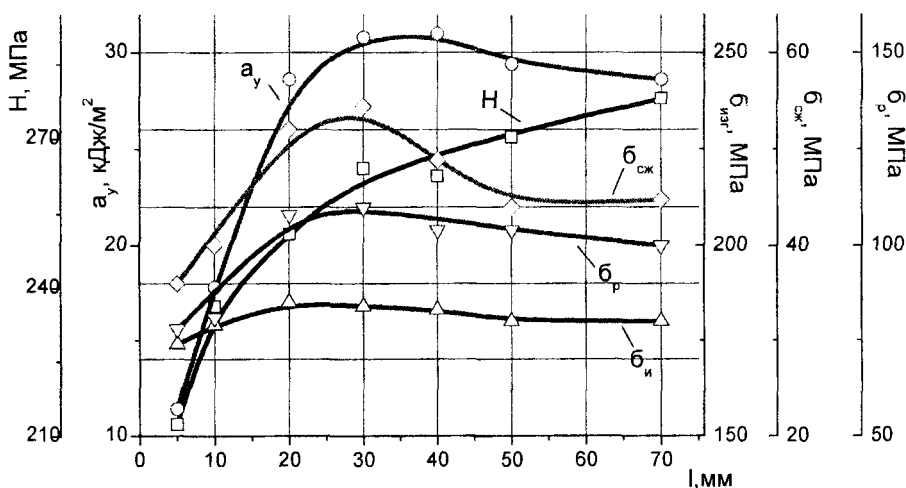


Рис. 2. Зависимость механических свойств армированных древесных пластиков от размера волокнистого наполнителя при аппретировании СВ 5 % раствором ПВБ

Из рисунка видно, что область оптимума сместилась в сторону увеличения длин волокон (30..40 мм), т.е. оптимальная длина волокон увеличилась на 40...50 %.

Для армирования рубленым волокном характерна концентрация напряжений на концах волокон. Малым степеням наполнения соответствует минимальная концентрация напряжений при «недостаточной» адгезии. В этом случае несвязанные участки волокон имеют возможность перемещаться и «разгружать» перенапряженные области матрицы. Дальнейший рост концентрации наполнителя при хорошей адгезии фаз также ведет к выравниванию напряжений. Однако хрупкие волокна мешают развитию пластических деформаций матрицы (эффект стеснения), вызывая ее охрупчивание и снижение допустимых значений растягивающих напряжений и ударной вязкости. Эти нежелательные эффекты снижаются при форми-

ровании на границе раздела «матрица - жесткое волокно» эластичной фазы. Оценка остаточных микронапряжений после термоусадки подтвердила релаксацию напряжений в случае обработки волокон модифицированной Р-2. Малая массовая доля эластомера не позволяет отнести этот эффект только за счет релаксации напряжений в объеме эластичной фазы. Возможно, в этом случае имеет место создание градиентных структурных слоев матрицы с разной степенью сшивки вблизи поверхности армирующих волокон.

Таким образом, описанный способ аппретирования позволяет улучшить механические характеристики армированных пластиков как за счет увеличения верхнего предела диапазона допустимых длин волокон, так и за счет снижения уровня остаточных напряжений и эффекта «охрупчивания» полимерной матрицы. Экспериментальные данные подтверждают увеличение предела прочности на изгиб на 30 %, ударной вязкости - на 20 %.

На базе проведенных исследований созданы новые композиционные материалы: древопласт композиционный армированный (ДПКА) и фенолстекловолокнит (ФСВ). Разработанные материалы внедрены в конструкции муфт свободного хода девяти наименований зерно- и кормоуборочной техники, выпускаемой РУП «Гомсельмаш» (рис. 3,4), с экономическим эффектом свыше 120 млн. руб. в ценах 2004 г.

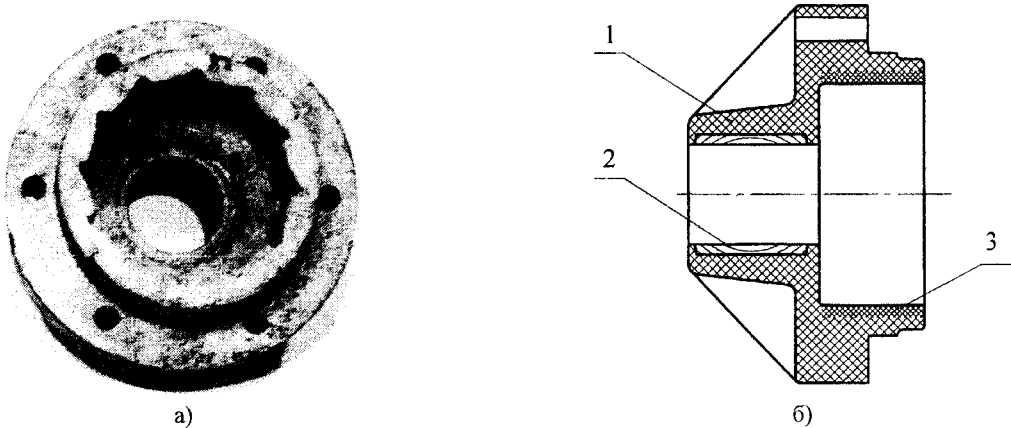


Рис. 3. Корпус муфты древесно-полимерной:
а - общий вид; б - разрез:

1 - корпус из ДПКА; 2 - антифрикционная прессованная древесина; 3 - зубчатый венец из ФСВ

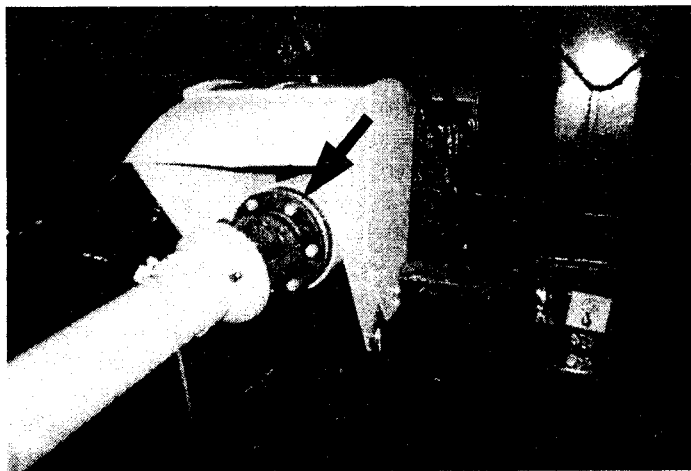


Рис. 4. Узел кормоуборочного комбайна КС-100
(стрелкой обозначена муфта свободного хода)

ЛИТЕРАТУРА

1. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Ошмян, Н.С. Ениколопов. - М.: Химия, 1990. - 240 с.
2. Белый В.А., Врублевская В.И., Купчинов Б.И. Древесно-полимерные конструкционные материалы и изделия. - Мн.: Наука и техника, 1980. - 280 с.
3. Заявка на изобретение а 20041088 МПК 7 С 08L 61/100 С 08K 5/00 Древесная пресс-композиция / Екименко А.Н., Колдаева С.Н., Колдаев О.Ю. (ВУ); Заявл. 25.11.2004 г.