

УДК 674.81

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА И СТРУКТУРЫ ДВУТАВРА ИЗ АРМИРОВАННОГО ДРЕВЕСНОГО ПЛАСТИКА*© А.Н. Екименко¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.**А.С. Неверов², д-р техн. наук, проф.*

¹Институт инновационных исследований, ул. Карповича, 5/18, г. Гомель, Республика Беларусь, 246017; e-mail: a.ekimenko@beloil.by

²Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, г. Гомель, Республика Беларусь, 246653; тел.: (0232) 95–39–32

Рассматривается эффективность использования древесно-полимерной пресс-композиции, комбинированно армированной рубленым стекловолокном и углеродным графитизированным волокном для изготовления композиционного двутавра новым способом плунжерной экструзии, позволяющим непосредственно в процессе формирования изделия армировать его вдоль по контуру средней линии сечения непрерывными струнами в виде шпагата из высокопрочных материалов с натяжением до 60...90 % их прочности на разрыв. Исследована эффективность модификации фенолформальдегидной смолы кремнийорганическим полимером для повышения смачивающей способности составного связующего по отношению к армирующим волокнам и ударной вязкости композита, а также его экологичности при переработке. Разработан состав термоактивной древесно-полимерной пресс-композиции, отличающейся повышенной ударной вязкостью, водо- и химстойкостью, сопротивлением усталости. Исследованы физико-механические свойства двутавров, изготовленных из нового композита оригинальным методом плунжерной экструзии. Учитывая, что жесткость нового композиционного материала превышает аналогичный показатель для прямослойной цельной древесины сосны 1-го сорта, а также то, что композиционный двутавр из него имеет существенно меньшую себестоимость и более высокую атмосферостойкость по сравнению с брусьями или клееными двутавровыми балками из прямослойной древесины, представляется перспективным использовать его для широкого применения в фермных конструкциях с повышенными требованиями к прочности и долговечности. Существенное снижение стоимости композиционных балок может быть достигнуто за счет применения доступного и дешевого сырья: измельченных отходов древесины, отходов стеклянных и углеродных волокон химических производств в виде путанки, которые в настоящее время практически не вовлекаются повторно в производство и не утилизируются, являясь источником экологического загрязнения.

Ключевые слова: армированный древесный композит, двутавровая балка, плунжерная экструзия, комбинированное армирование.

В начале 90-х годов XX в. в США и Канаде появились компании, производящие фермные конструкции, в которых вместо традиционных брусьев из цельной древесины или металлических профилей и двутавров использовались двутавровые балки из древесных пластиков [4, 5]. Причем ребра жесткости в них выполняли из МДФ (древесноволокнистой плиты средней плотности – MDF) или цельной древесины, перегородку – из плит OSB (рис. 1, а).

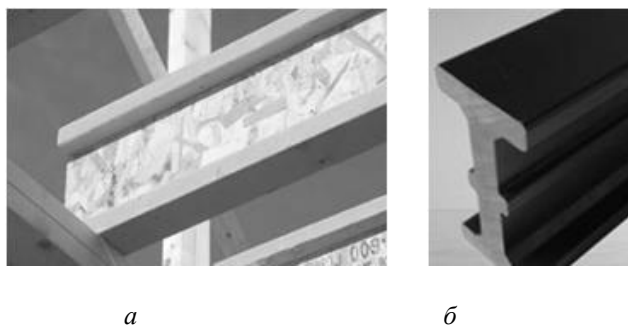


Рис. 1. Балки двутаврового профиля из древесного пластика: *а* – комбинированная конструкция (ребра жесткости из цельной древесины, перегородка из плиты OSB); *б* – балка из неармированного древесно-полимерного композита

Балка двутаврового профиля прочнее балки квадратного профиля аналогичной площади сечения. Кроме того, применение двутавровых балок позволяет минимизировать деформации конструкции вследствие усадки и сдвига, практически исключив ее скрип.

Предпосылкой подобного технического решения стало стремление снизить стоимость конструкции фермы, поскольку брусья из цельной прямослойной древесины 1-го сорта (без сучков и других пороков) или металлические профили достаточно дорогие материалы. Добившись существенного (в несколько раз) снижения стоимости ферм, производители столкнулись с увеличением трудоемкости изготовления, усложнением конструкции, ростом числа промежуточных силовых элементов.

Дело в том, что в силу недостаточно высокой прочности двутавров из древесных композитов длина пролета фермы значительно сокращается (по сравнению с использованием традиционных материалов) и возникает необходимость в дополнительном усилении конструкции. Стандартным решением стало использование металлических соединительных пластин (рис. 2, *а*), профилей и их сочетаний (рис. 2, *б*).

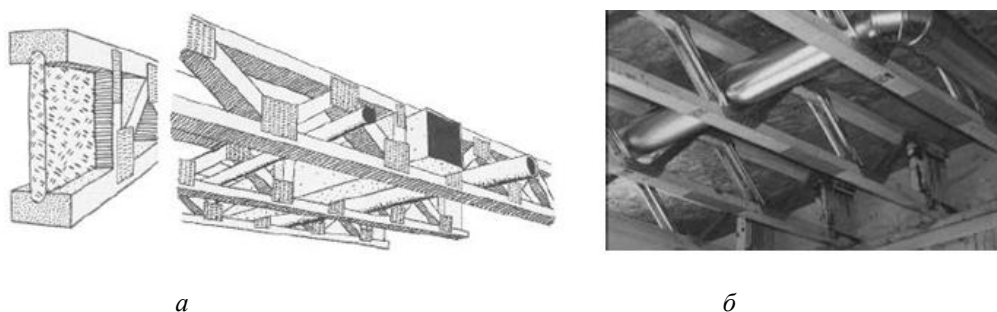


Рис. 2. Конструкции ферм с использованием двутавров из древесного пластика: *а* – соединение конструкции металлическими пластинами (вид с разных сторон); *б* – комбинированное соединение

В дальнейшем направление исследований было в основном сосредоточено на оптимизации формы и геометрии пролетов и соединении их в единую конструкцию. В плане развития конструкции и структуры балки из древесного композита было предложено использовать конструкции,

экструдированные из термопластичной древесно-полимерных композиций (см. рис. 1, б). Однако прочность таких балок была существенно ниже, чем у традиционных из цельной древесины и металлических профилей или комбинированных.

Результаты исследования и их обсуждение

В рамках работ по развитию технологии производства длинномерных изделий из армированных древесных композитов были проведены исследования по разработке конструкции, структуры и материала для композиционного двутавра, обладающего прочностью на изгиб, сравнимой с брусом (аналогичной ширины и высоты) из цельной прямослойной древесины 1-го сорта, но отличающегося от него повышенной термо- и влагостойкостью, устойчивостью к гниению.

Естественным конструктивным решением нам представляется разработка структуры двутавра на основе древесного композита, армированного рубленым стекловолокном и дополнительно армированного вдоль оси изделия непрерывными натянутыми струнными элементами.

Ранее нами был разработан способ плунжерной экструзии, позволяющий непосредственно в процессе изготовления изделий производить их армирование вдоль по контуру средней линии сечения напряженными струнными элементами из высокопрочного стекловолоконного или арселенового шпагата диаметром 2,5...3,0 мм. Отличительной особенностью способа является использование предварительного натяжения струнных элементов до 60...90 % их разрывной прочности, что позволяет сформировать в структуре материала локальные области с напряжением сжатия (вокруг струн) и обеспечить строгую ориентацию струн в изделии.

Локальные области с предварительным напряжением сжатия формируются после отверждения изделия, когда сила предварительного натяжения освобожденных струн передается окружающему материалу, в результате чего он оказывается сжатым. Благодаря такому преднапряжению сжатия возможна частичная или полная компенсация растягивающих напряжений – в процессе эксплуатации изделие будет иметь меньший прогиб и повышенную трещиностойкость.

Учитывая высокую удельную прочность арселенового или стекловолоконного шпагата, при его размещении в структуре двутавра из древесного композита теоретически возможно получить конструкцию, сравнимую по прочности с деревянным брусом. В результате, использование двутавра, армированного вдоль длины непрерывными параллельными струнами из стекловолоконного или арселенового шпагата, позволит перекрывать большие пролеты при равном сечении по сравнению с традиционными элементами.

Как показал опыт эксплуатации термореактивных древесных пластиков, армированных стекловолокном, вследствие длительного воздействия влаги и УФ-излучения возможна существенная деградация механических свойств древесного наполнителя и полимера матрицы [6].

В этой связи нами были проведены исследования, целью которых было определение влияния вида полимера связующего на сопротивление усталости образцов древесного композита.

Испытывали прямоугольные образцы (бруски) размером 200×300×70 мм, изготовленные прессованием из пресс-массы, содержащей, мас. %: измельченной древесины – 56...58, полимера связующего – 27...29, рубленого стекловолокна длиной 20...27 мм – 12, целевых добавок (в зависимости от вида связующего) – остальное. Испытывали пары склеенных внахлест со смещением по высоте брусков. Высота смещения составляла 60 мм. Нижний брусок закрепляли в кронштейне, причем его нижний торец опирался на упор. К верхнему торцу верхнего бруска прилагали давление и регистрировали его значение, при котором происходило нарушение клеевого соединения. Для имитации естественного старения пластика часть образцов подвергали ускоренному старению (1000 циклов вакуумирование (5 мин) – выдержка под давлением (12 МПа

в течение 3 мин) – вымачивание (2 ч при температуре 20 °С) – сушка (25 мин при 60 °С). Испытывали как исходные образцы, высушенные до влажности 12%, так и ускоренно состаренные. Результаты испытаний представлены в таблице.

Результаты испытаний на сдвиг склеенных образцов древесного пластика

Связующее (марка)	Ускоренно состаренные образцы		Исходные сухие образцы		Степень сохранения механической прочности, %
	напряжение сдвига, МПа	% разрушен- ных древесных волокон	напряжение сдвига, МПа	% разрушен- ных древесных волокон	
Бакелитовый лак (ЛБС-3)	18,7	24	19,0	6	98
Резорцин-формальдегидная смола (ФР-12)	10,9	1	19,4	0	56
Фенолрезорцин- формальдегидная смола (G4411)	12,1	0	18,4	1	66
Смесь карбамидной (КФ-МТ) и меламин- формальдегидной (К-421-02) смол в соотношении 1,2:1,0	13,8	18	18,7	5	74
Эпоксидная смола (ЭД-20)	11,2	2	22,1	49	51

Как видно из таблицы, при использовании фенолформальдегидного связующего обеспечивается наибольшее (98 %) сохранение свойств клеевой прослойки. В то же время в образцах с такой матрицей наблюдалось значительное повреждение древесных волокон, что можно объяснить разрушающим действием кислотной среды на древесину. Дело в том, что при длительной эксплуатации в условиях повышенной влажности и при слабокислой реакции среды, обусловленной присутствием остатка кислотного катализатора фенолформальдегидных смол (ФФС), наблюдается постепенный гидролиз наиболее уязвимой части древесных волокон – аморфной гемицеллюлозы [2].

Таким образом, по совокупности факторов (стоимость полимера связующего – длительная механическая прочность клеевой прослойки) оптимальным полимером в качестве исходного компонента для матрицы древесного пластика нами была принята ФФС. Но, поскольку немодифицированная ФФС обладает недостаточной адгезией к стеклянному бесщелочному волокну (в исходном состоянии покрытому замазливателем), а также в отвержденном состоянии имеет достаточно низкую ударную вязкость ($6...8 \text{ кДж/м}^2$), необходимо определить способ модификации смолы для достижения требуемых свойств.

В качестве аппретов стекловолокна, повышающих его смачиваемость смолой, эффективны силаны, имеющие следующую общую формулу [3]:



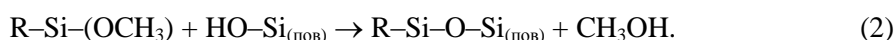
где R – оргонофункциональная группа;

X_3 – гидролизуемая функциональная группа, по которой происходит химическое взаимодействие с поверхностью стекловолкна.

Совместимость аппрета со смолой зависит от типа радикала R в аппрете.

В качестве добавки к ФФС была выбрана кремнийорганическая смола К-9Б (продукт конденсации метилсилантриола с фенилсилантриолом), в данном случае выполняющая роль как аппрета стекловолкна, так и модифицирующей добавки, повышающей эластичность матрицы и снижающей содержание свободного фенола и формальдегида в отвержденном связующем. Последнее достигается за счет существенного повышения степени конденсации составного связующего.

Благодаря хорошей совместимости смолы К-9Б как с бакелитовыми лаками, принятыми в качестве основы связующего, так и со стекловолкном, технология аппретирования отличалась от общепринятой: вместо отдельной обработки волокон аппретом и последующего смешения их со связующим использовали непосредственное смешение волокон с составным связующим (бакелитовый лак ЛБС-3 со смолой К-9Б в соотношении 3:1). При этом кремнийорганическая группа смолы вступала в реакцию с гидроксильными группами на поверхности стеклянных волокон, образуя химическую связь с повышенной адгезионной прочностью и стойкостью в агрессивных средах и воде:



При отверждении модифицированного связующего фенильная группа смолы К-9Б реагировала с ФФС с образованием прочной химической связи, отличающейся повышенной эластичностью и термостойкостью, что в целом повышало термостойкость и ударную вязкость матрицы. При этом на поверхности стекловолкна формировалась пленка, характеризующаяся развитой поверхностью (рис. 3, а) и имеющая полную поверхностную энергию не менее 68 мДж/м^2 , в том числе полярных и дисперсионных составляющих – не менее 50 и 17 мДж/м^2 соответственно, что свидетельствует о ее высоких контактных свойствах. Микроскопические исследования, проведенные с помощью растрового электронного микроскопа, показали, что область контакта между волокном и матрицей характеризуется плотным соприкосновением поверхностей и отсутствием трещин и зазоров (рис. 3, б).

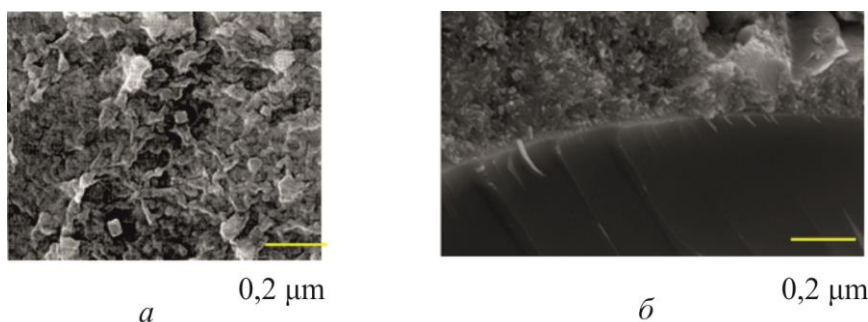


Рис. 3. Микрофотографии стеклянного волокна, обработанного ФФС, модифицированной кремнийорганической смолой К-9Б: а – поверхность волокна; б – граница раздела между волокном и матрицей

Для определения эффективности дополнительного армирования древесного композита непрерывными струнными элементами нами были проведены испытания на прогиб образцов

армированных двутавров длиной $l = 2$ м, шириной $b = 70$ мм, высотой $h = 80$ мм, толщина полки и перегородки $t_w = 20$ мм (рис. 4).

В качестве сравниваемого критерия был выбран модуль упругости. Поскольку целью исследований является сравнительная эффективность метода непрерывного армирования, был выбран наименее затратный инструментально и по времени алгоритм оценки: получить аналитическое выражение, связывающее искомый модуль упругости материала с параметрами его геометрии (момент инерции), приложенной нагрузкой и величиной прогиба от этой нагрузки. Для заданной конфигурации бруса определим момент инерции в плоскости, параллельной плоскости полок (по оси x), исходя из принципа суперпозиции (момент инерции сложной фигуры равен сумме моментов инерции составляющих ее простых фигур [1]):

момент инерции ($I_A, \text{см}^4$) прямоугольника А (рис. 4, а):

$$I_A = bh^3 / 12; \quad (3)$$

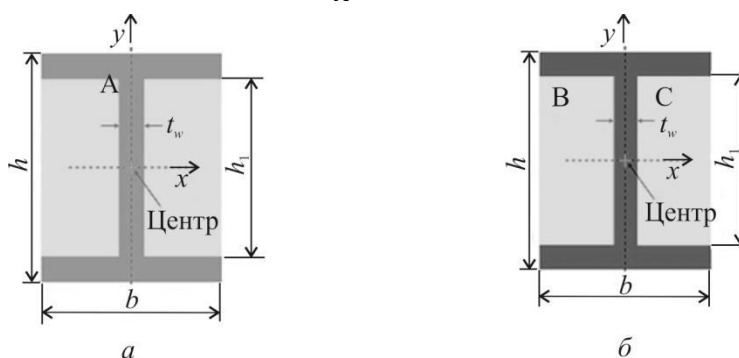


Рис. 4. Сечение образца двутавра из древесного пластика: а – прямоугольник А, б – прямоугольники В и С; b – ширина полки по оси x ; h – высота двутавра по оси y ; t_w – толщина перегородки; h_1 – высота стенки

моменты инерции прямоугольников В и С:

$$I_B = I_C = \left(\frac{b - t_w}{2} \right) h_1^3 / 12. \quad (4)$$

Тогда искомый момент инерции двутавра

$$I = I_A - 2I_B = \left(bh^3 - 2 \frac{b - t_w}{2} h_1^3 \right) / 12 = 272 \text{ см}^4. \quad (5)$$

Испытывали образцы, комбинированно армированные рубленым стекловолокном и углеродным графитизированным волокном, и образцы из пресс-композиции аналогичного состава, но дополнительно армированные непрерывными струнами из арселонového шпагата диаметром 3 мм, которые размещали вдоль по контуру средней линии сечения двутавра (расстояние между струнами – 8 мм).

Состав пресс-композиции, мас %: измельченная древесина – 58; бакелитовый лак ЛБС-3, модифицированный кремнийорганической смолой К-9Б в соотношении 3:1 – 27; стеклянного бесщелочного волокна длиной 21...27 мм – 9; углеродного графитизированного волокна длиной 17...21 мм – 3; поливинилбутираля – 0,9; смеси гексаметилентетрамина с хлористой медью – 0,6; окиси хрома – 0,2; стеарата алюминия – 1; мочевины – 0,3.

Каждый испытываемый образец размещали горизонтально, один его конец жестко закрепляли в кронштейне, другой свободно опирали на упор. К центру тяжести образца прилагали нагрузку 120 кг и регистрировали прогиб балки. Для балок с дополнительным армированием прогиб составил 4,7 мм, для балок без дополнительного армирования струнными элементами – 6,6 мм. Согласно [2] модуль упругости при изгибе материала образцов определяли следующим образом:

$$E = k_1 \frac{Fl^3}{48fl}, \quad (6)$$

где k_1 – коэффициент перевода в систему СИ, $k_1 = 9,81 \cdot 10^4$;

F – нагрузка, приложенная к балке, кгс;

f – прогиб, см;

I – момент инерции, см⁴.

После подстановки в уравнение (6) опытных значений прогиба следует, что применение дополнительного армирования балки непрерывными струнными элементами даже при незначительном (менее 2,5 %) содержании армирующих элементов по массе относительно массы основного изделия наблюдается существенное увеличение жесткости материала (от 1,12 до 1,57 ГПа, т.е. на 41 %).

Полученная жесткость материала композиционного двутавра превышает аналогичный показатель для прямослойной цельной древесины сосны 1-го сорта (1,00...1,14 ГПа). Существенно меньшая себестоимость композиционных балок по сравнению с брусками или клееными двутавровыми балками из прямослойной древесины, а также их более высокая атмосферостойкость делает такие изделия перспективными для широкого применения в ферменных конструкциях с повышенными требованиями к прочности и долговечности. Снижение стоимости композиционных балок обеспечивается использованием доступного и дешевого сырья: измельченных отходов древесины, отходов стеклянных и углеродных волокон химических производств в виде путанки, которые практически не вовлекаются повторно в производство и в настоящее время не утилизируются, являясь источником экологического загрязнения.

Сочетание в структуре древесного композита дополнительного армирования непрерывными струнными элементами с использованием кремнийорганического модификатора связующего, обеспечивающего повышение ударной прочности, термо- и водостойкости отвержденной матрицы, существенно расширяет возможности применения таких материалов. Перспективным направлением могло бы стать производство труб технологических трубопроводов (как в виде самостоятельных изделий, так и в качестве внутренней трубы многослойных труб), строительных длинномерных конструкций (балки различного профиля), досок (например, как составных частей конструкций ограждения). В дальнейшем представляется целесообразным провести более детальное исследование влияния предварительного напряжения, создаваемого в структуре древесного композита, армированного рубленым волокном, от дополнительных армирующих струнных элементов, укладываемых по средней линии сечения формируемого изделия непосредственно в процессе формирования в растянутом напряженном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 2009. 560 с.
2. Никитин В.М., Оболенская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 367 с.
3. Arkles B. Silane Coupling Agents: Connecting Across Boundaries. Gelest Inc., 2006, 60 p.
4. Engineering Components for Efficient Framing. Wood Truss Council of America (WTCA), Madison, WI, 1998.
5. I-Joist. The Green Building Solution. Available at: <http://www.internationalbeams.com/i-joists/>.
6. Spaur F.D. Reinforcement of wood with fiberglass // Forest Products Journal. 1981. N. 31(4). P. 26–33.

Поступила 29.11.13

УДК 674.81

Material and Structure of the I-Girder From the Reinforced Wood Plastic Development

A.N. Ekimenko¹, Candidate of Engineering, Senior Researcher

A.S. Neverov², Doctor of Engineering, Professor

¹Institute of Innovative Researches, Karpovicha str. 5/18, Gomel, 246017, Belarus;

e-mail: a.ekimenko@beloil.by

²Belorussian State University of Transport, Kirov str., 34, Gomel, 246653, Belarus;

ph: (0232) 95-39-32

In article the wood-plastic moulding composition structure with a combined reinforcing by glass fibers and carbon graphitized fibres is described. Efficiency of the given material for composite I-joint manufacturing new ram extrusion method, allowing directly in the time of product formation to carry out its reinforcing lengthways on an average line of section contour by strings in the form of a twine from high-strength materials, with a tension to level of 60-90 % of their breaking strength, is considered. Efficiency of phenol-formaldehyde pitches modification by poly-organosiloxanes regarding to increasing of moistening ability compound binding in relation to reinforcing fibres, increases of impact strength of a composite and its ecological compatibility at processing is investigated. The structure of the thermosetting wood-plastic moulding composition, with the raised impact strength, water-, chemical and fatigue resistance, is developed. Physico-mechanical properties of the I-joists, made by an original ram extrusion method from a new composite, are investigated. Considering, that rigidity of a new composite material exceeds a similar indicator for straight-grained whole section timber of a first-class pine, and also essentially smaller cost price of composite I-joint from it in comparison with bars or glued I-joists from straight-grained wood; their higher weather resistance - such products are represented perspective for wide application in truss constructions with increased requirements to strength and durability. The essential composite I-joint depreciation is provided with use of accessible and cheap raw materials: the crushed waste of wood, a waste of glass and carbon fibres from chemical manufactures in a kind of waste matches which practically are not involved in repeated manufacture and, now are not utilised, being a source of ecological pollution.

Keywords: reinforced wood composite, I-joint, ram extrusion, combined reinforcing.

REFERENCES

1. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Soprotivlenie materialov [Resistance of Materials]. Moscow, 2009. 560 p.
 2. Nikitin V.M., Obolenskaya A.V., Shchegolev V.P. Himiya drevesiny i cellulozy [Wood and Cellulose Chemistry]. Moscow, 1978. 367 p.
 3. Arkles B. Silane Coupling Agents: Connecting Across Boundaries. Gelest Inc., 2006, 60 p.
 4. Engineering Components for Efficient Framing, Wood Truss Council of America (WTCA), Madison, WI, 1998.
 5. I-Joist, The Green Building Solution. Available at: <http://www.internationalbeams.com/i-joists>.
 6. Spaun F.D. Reinforcement of Wood with Fiberglass. *Forest Products Journal*, 1981, no. 31(4), pp.26-33.
-