

УДК 621.791.16

DOI 10.18698/0536-1044-2016-6-82-89

Технология изготовления волоконистых нетканых материалов с помощью ультразвуковой сварки

С.С. Волков¹, А.А. Дерябин¹, Л.А. Шестель²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² Омский государственный технический университет, 644050, Омск, Российская Федерация, пр-т Мира, д. 11

The Technology of Manufacturing Fibrous Non-Woven Materials by Ultrasonic Welding

S.S. Volkov¹, A.A. Deryabin¹, L.A. Shestel²

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² Omsk State Technical University, 644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11



e-mail: map@bmstu.ru, aad1_2000@mail.ru, weldtechn@mail.ru



Рассмотрены технологические процессы изготовления нетканых материалов, сущность которых заключается в получении волоконистых холстов и создании между волокнами прочных связей с помощью ультразвуковой сварки. При этом холст может состоять из полипропилена, лавсана и капрона. Установлено, что процесс образования сварного соединения можно условно разделить на три стадии. На первой из них происходит частичное размягчение поверхности волокон, расположенных в слоях, прилегающих к волноводу. На второй стадии волокна, расположенные в слоях, прилегающих к волноводу, полностью переходят в вязкотекучее состояние, и размягченный термопластичный полимерный материал вдавливаются сварочным давлением во внутренние слои холста, скрепляя их. На третьей стадии происходит полный переход термопластичного материала между волноводом и опорой в вязкотекучее состояние. Шов приобретает вид прозрачной пленки и имеет хорошую прочность. Установлено, что разогрев волоконистых материалов при ультразвуковой сварке протекает без теплообмена с окружающей средой. Определены оптимальные параметры режима изготовления нетканых материалов.

Ключевые слова: нетканый материал, холст, ультразвуковая сварка, шов, прочность, амплитуда, частота, давление.



Technological processes of manufacturing non-woven materials are described in this article. The essence of the processes lies in manufacturing fibrous canvases and creating strong bonds between the fibers using ultrasonic welding. The canvas can consist of polypropylene, Dacron and kapron. It is established that the process of formation of the welded joint can be divided into three stages. The first stage sees partial softening of the fiber surfaces in the layers adjacent to the waveguide. At the second stage, the fibers in the layers adjacent to the waveguide fully transition to the viscous-flow state, and the softened thermoplastic polymeric material is pressed by the welding pressure into the inner layers of the canvas while binding them. At the third stage, the thermoplastic material between the waveguide and the pillar fully transitions into the viscous-flow state. The seam takes the form of a transparent film and has good durability. It is established that heating of the fibrous materials by ultrasonic welding occurs without heat exchange with the environment. Optimal parameters of manufacturing nonwovens materials are determined.

Keywords: nonwoven materials, canvas, ultrasonic welding, seam, strength, amplitude, frequency, pressure.

С каждым годом возрастает значение нетканых текстильных материалов (НТМ), технология производства которых существенно отличается от классических способов изготовления синтетических тканей. Увеличение выпуска НТМ технического назначения позволит высвободить большой парк ткацких станков и переключить их на производство товаров широкого потребления.

Цель работы — получение новых способов соединения волокнистых синтетических материалов и создание на их основе новых структур.

Волокнистые НТМ имеют хорошие фильтрационные свойства и высокую прочность. Сущность технологии изготовления нетканых материалов-полотен заключается в получении волокнистых холстов (ВХ) и образовании между волокнами прочных связей [1]. Холст — это определенным образом сформировавшийся слой, состоящий из равномерно распределенных в нем нескрепленных волокон. К преимуществам способов изготовления НТМ относят: производительность, значительно превышающую производительность ткацких станков; возможность автоматизации процессов и объединения в поточную линию агрегатов для изготовления или подготовки волокон, формирования ВХ, скрепления волокон в холсте и отделки материала; низкую стоимость получаемых НТМ; возможность использования в некоторых материалах в качестве сырья непрядевых отходов текстильного и других производств; широкий диапазон пористости и плотности материалов.

Наиболее широкое распространение получил клеевой способ изготовления НТМ, при котором связь между волокнами определяется адгезией связующего к волокнам. Кроме того, применяют различные механические технологии — вязально-прошивную, иглопробивную и валяльно-войлочную, а также способы: горячего прессования, производства НТМ из расплава полимера, бумагоделательный и др.

Наряду с несомненными достоинствами указанным способам присущи и недостатки, обуславливающие хаотическую ориентацию волокон, ограниченную толщину получаемого материала и его низкую прочность. В большинстве случаев прочность волокон не превосходит 20 % прочности материала [2, 3].

На кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана проведены исследования в области создания НТМ посредством ультразвуковой сварки (УЗС) холстов, сформированных из термопластичных волокон либо из их смеси с натуральными или химическими волокнами, а также разработаны технологии и оборудование для изготовления НТМ с помощью ультразвука [1]. Сущность такого способа заключается в том, что волокна холста, которые могут быть ориентированы или распределены случайно, скрепляются посредством УЗС. При этом холст может состоять из термопластичных волокон (полипропилена, капрона, лавсана, сарана, хлорина и др.) либо из их смеси с хлопком, вискозой, шерстью и другими нетермопластичными волокнами. В последнем случае размягченная термопластичная составляющая обволакивает нетермопластичные волокна, образуя прочные соединения. С увеличением содержания нетермопластичных волокон прочность НТМ уменьшается практически линейно. При этом предельно допустимым содержанием нетермопластичных волокон следует считать 65 % [4].

Из всего разнообразия карбо- и гетероцепных волокон исследовали по одному типу волокон каждого класса: полипропиленовые и полиэтилентерефталатные (лавсановые). Такой выбор обусловлен свойствами этих волокон, в частности, гидрофобностью, делающей их незаменимыми для изготовления волокнистых фильтров, работающих во влажной среде [3]. Поскольку ВХ характеризуются большим коэффициентом затухания, их скрепление можно выполнять по схеме контактной УЗС [1].

Для непрерывного осуществления процесса наиболее приемлем способ шовно-шаговой сварки, являющейся разновидностью пресовой сварки, с шаговым перемещением материала. Такая технологическая схема предотвращает деформации и разрывы нескрепленного холста при сварке и транспортировке готового материала на заданный шаг. При этом сварные швы располагают как в направлении, перпендикулярном продольной оси холста, так и под углом к оси (рис. 1, а, б). Протяженные швы можно получить при использовании нескольких сварочных головок, установленных таким образом,

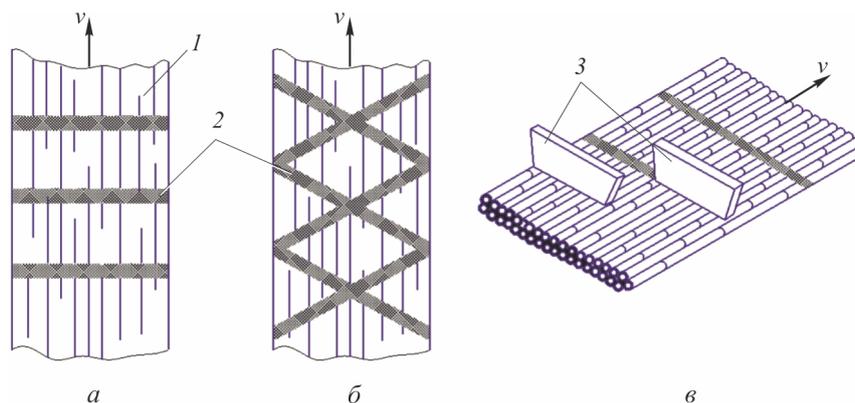


Рис. 1. Схемы расположения сварных швов при изготовлении нетканых материалов-полотен (а, б) и сварных ножевых волноводов-инструментов (в):

1 — ВХ; 2 — сварные швы; 3 — ножевые волноводы-инструменты; v — скорость перемещения волокна или волновода

чтобы обеспечивалось необходимое перекрытие сварных швов (рис. 1, в).

Первые эксперименты по УЗС холстов различного развеса, состоящих только из термопластичных волокон, проведенные на режимах, применяемых для сварки сплошных полимерных материалов, не дали положительных результатов. Возникла необходимость исследования особенностей процесса теплообразования в волокнистых термопластичных материалах под действием ультразвуковых колебаний, так как режим сварки определяет количество энергии, вводимой в свариваемый материал и, следовательно, возможность разогрева зоны сварки до температуры вязкотекучего состояния [5].

В этом случае процесс образования сварного соединения можно условно разбить на три стадии. На первой из них происходит частичное размягчение поверхности волокон, расположенных в слоях, прилегающих к волноводу. При этом шов имеет спрессованную волокнистую структуру и незначительное усилие разрыва. На второй стадии волокна, расположенные в слоях, прилегающих к волноводу, полностью переходят в вязкотекучее состояние, и размягченный термопластичный полимерный материал вдавливается сварочным давлением во внутренние слои холста, скрепляя их. При этом шов имеет характерный матовый оттенок и значительную прочность. На третьей стадии происходит полный переход термопластичного материала между волноводом и опорой в вязкотекучее состояние. Шов приобретает вид прозрачной пленки толщиной 15...20 мкм и имеет хорошую прочность.

Все эксперименты проводили на лабораторной установке УЗП-1 с использованием магнито-стрикционного преобразователя (мощностью

1,6 кВт и резонансной частотой 22 кГц) с ножевым экспоненциальным волноводом из титанового сплава ВТ5. Для опоры применяли стальную плиту толщиной 20 мм.

В качестве источника питания магнито-стрикционного преобразователя использовали модернизированный серийно выпускаемый фирмой «Ультразвуковая техника ИНЛАБ» ультразвуковой генератор типа ИЛ10-1,5 с расширенным диапазоном частот от 20 до 70 кГц, массой 12 кг и габаритными размерами 310×310×160 мм. Генератор оснащен плавной регулировкой мощности до 1,5 кВт, цифровым частотомером, аналоговым индикатором резонанса акустической системы, фазовой автоподстройкой частоты и источником поляризации с выходным током до 30 А. Охлаждение генератора — воздушное, принудительное. Выходная частота может меняться в любую сторону.

В процессе работы установки частоту ультразвуковых колебаний контролировали с помощью цифрового частотомера, вмонтированного в ультразвуковой генератор ИЛ10-1,5, амплитуду колебаний волноводов-инструментов измеряли с помощью специально разработанных авторами датчиков. Пульт управления оснащен системой защиты и не позволяет начинать работу при перегреве или при недостаточном давлении в системе.

Сварку выполняли по циклу сварочное давление — ультразвук — сварочное давление. Такой цикл позволяет охлаждать шов под сварочным давлением после отключения ультразвуковых колебаний, что существенно влияет на повышение прочности сварных соединений холста и, кроме того, предотвращает расползание волокон в расплавленном состоянии [4]. Сварку проводили на отработанных оптималь-

ных режимах: для холстов, сформированных из полипропиленовых волокон, амплитуда колебаний $A = 30$ мкм, статическое сварочное давление $p_{ст} = 3,5$ МПа, время сварки $t_{св} = 0,25$ с; для холстов, сформированных из полиэтилен-терефталатных волокон, $A = 35$ мкм, $p_{ст} = 2,7$ МПа, $t_{св} = 0,3$ с.

Можно предположить, что основным источником теплоты при УЗС волокнистых термопластичных материалов являются гистерезисные потери от циклического деформирования. В настоящее время проведены исследования влияния температуры разогрева при циклическом деформировании на усталостную прочность материалов [5]. Установлено, что интенсивное теплообразование в испытуемом образце происходит после достижения определенной критической температуры, что обусловлено резким изменением релаксационных характеристик волокнистого полимерного материала (ВПМ) — динамического модуля и механических потерь [5, 6]. Критическая температура не зависит от амплитуды нагрузки, круговой частоты, условий теплоотвода в волновод и опору и определяется только физико-механическими свойствами ВПМ, режимом нагружения и температурой окружающей среды [7].

Для сравнения кинетики разогрева волокнистых и сплошных полимерных материалов при циклическом деформировании проводили термографирование процесса сварки ВПМ с помощью электронно-лучевого осциллографа [8]. Преимуществом такого способа перед светолучевыми методами осциллографирования является практически полная безынерционность. Длительное послесвечение электронно-лучевой трубки позволяет наблюдать визуально и фотографировать термограммы с экрана осциллографа.

В экспериментах использовали хромель-копелевые термопары, имеющие высокую термическую электродвижущую силу. Для одновременного наблюдения двух и более кривых термического цикла, помимо многолучевых осциллографов, можно использовать различные типы коммутаторов. В данном случае использовали коммутатор на шаговом искателе, что позволило получить четкие осциллограммы с двух или трех термопар при исследовании распределения температур по толщине свариваемого термопластичного ВПМ.

Режим разогрева во всех точках ВПМ — высокотемпературный. В слоях, прилегающих к

волноводу, к концу сварки наступает тепловое равновесие, во внутренних слоях это не наблюдается.

Характер термических циклов при сварке ВХ (рис. 2) сходен с характером термических циклов при сварке сплошных термопластичных мягких материалов, например полиэтилена толщиной до 5 мм (рис. 3). Критическая температура $T_{кр}$ перехода к интенсивному разогреву составляет 100 °С при сварке материалов из полипропиленовых волокон и 130 °С при сварке

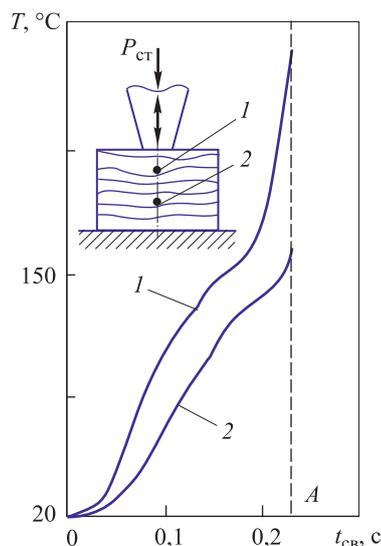


Рис. 2. Термический цикл сварки ВПМ (точка А — отключение ультразвука): 1 и 2 — термопары

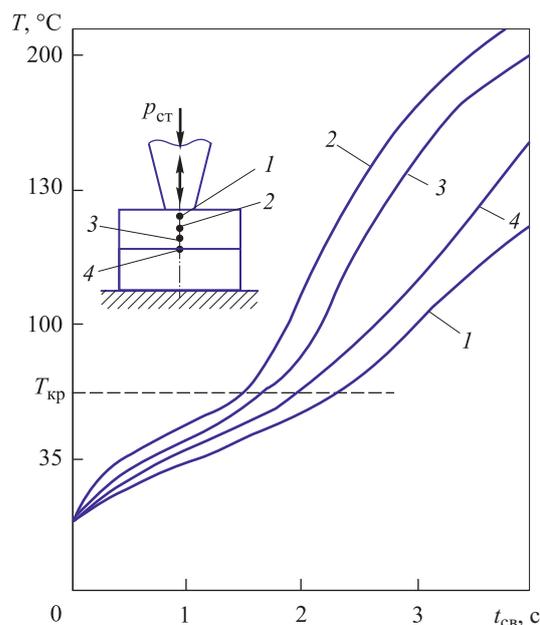


Рис. 3. Термический цикл сварки полиэтилена низкой плотности: 1–4 — термопары

материалов из полиэтилентерефталатных волокон при температуре окружающей среды 23 °С. Время достижения $T_{кр}$ в различных точках неодинаково. Это связано с неравномерностью распределения амплитуд напряжений и деформаций и температурными условиями на границах волновод — материал и материал — опора.

Интенсивность тепловыделения в некоторой степени зависит от механических потерь в термопластичном материале, которые у ВПМ больше, чем у сплошных. Следовательно, время разогрева до температур вязкотекучего состояния (сварки) у волокнистых материалов будет гораздо меньшим, чем у сплошных. Кроме того, у волокнистых материалов, по сравнению со сплошными, теплопроводность ниже вследствие наличия воздушных прослоек [9].

Можно предположить, что разогрев ВПМ при УЗС будет приближаться к адиабатическому, т. е. происходить без теплообмена с окружающей средой. Зону, выделенную сварочным давлением в волокнистом материале, можно представить как эквивалентный ему сплошной вязкоупругий стержень, по которому распространяются продольные колебания (рис. 4).

Примем следующие положения: стержень закреплен на конце $x = 0$, так как податливость материала опоры много ниже, чем у полимерного материала; боковая поверхность стержня теплоизолирована; теплофизические и релаксационные характеристики материала не зависят от температуры; вся механическая энергия, затрачиваемая на циклическое деформирование стержня, переходит в тепловую.

Предположим, что в сечении $x = 0$ температура практически равна начальной температуре

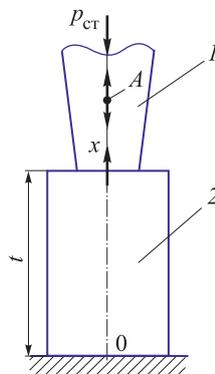


Рис. 4. Сплошной вязкоупругий стержень, по которому распространяются продольные колебания:

1 — волновод-инструмент;
2 — закрепленный стержень

стержня, а в сечении $x = l$ происходит теплообмен между поверхностью нагретого полимерного материала и холодным волноводом. В рассматриваемом случае наибольшая температура разогрева будет непосредственно под волноводом.

Исходя из этого представим кинетику образования сварного соединения при сварке ВПМ следующим образом. В начальный момент сварки непосредственно под волноводом образуется вязкотекучая прослойка, поскольку здесь развивается наибольшая температура. Под действием статического сварочного давления расплавленный полимерный материал вдавливается во внутренние слои ВХ. При малой поверхностной плотности полимерного материала вязкая масса проникает на противоположную сторону, подогревая его по всей толщине, что значительно сокращает время сварки. Когда толщина ВПМ сравнима с расстоянием, на которое перемещается вязкая масса под действием заданного сварочного давления, время сварки должно изменяться незначительно. Дальнейшее увеличение поверхностной плотности ВПМ приведет к резкому возрастанию времени сварки.

При проведении экспериментов ВПМ с различной поверхностной плотностью сваривали до полного проплавления, которое фиксировали по образованию сварного шва в виде характерной прозрачной пленки (рис. 5). При этом амплитуду смещения рабочего торца волновода поддерживали на минимальном уровне ($A = 20$ мкм), а давление, близкое к максимальному, составляло 4 МПа. Поверхностную плотность образцов определяли на аналитических

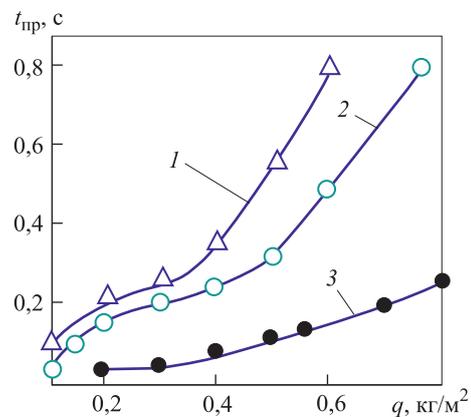


Рис. 5. Зависимость времени $t_{пр}$ полного проплавления от поверхностной плотности q холста ($A = 20$ мкм, $p_{ст} = 4$ МПа):

1 — полиэтилентерефталат; 2 — полипропилен;
3 — хлорин

весах второго класса. Наличие на кривых участков, соответствующих тем значениям поверхностной плотности, при которых время проплавления изменяется незначительно, и точек перегиба, после которых наблюдается резкое увеличение времени проплавления, подтверждает правильность выдвинутого предположения о кинетике образования сварного шва при УЗС волокнистых материалов.

Следует отметить, что с увеличением значений основных параметров режимов сварки разрывное усилие сварных швов не падает до нуля. Поскольку изменение разрывного усилия в большей мере обусловлено утонением полимерного материала в процессе сварки, остаточная толщина шва остается неизменной на этих режимах. Это явление, названное автостабилизацией толщины шва, впервые обнаружено при сварке полимерных пленок [10]. Стабильность толщины шва можно объяснить тем, что в процессе утонения зоны сварки происходит постоянное перераспределение теплоты, выделяющейся в полимере вследствие гистерезисных потерь в материале, и теплоты, отводимой в холодные волновод и опору. Очевидно, что при определенной минимальной толщине шва наступает тепловое равновесие или количество отводимой теплоты превалирует над количеством теплоты, выделяющейся в полимере, вследствие чего температура в зоне сварки начинает падать.

Увеличение времени пропускания ультразвукового импульса при сварке ВХ из полиэтилентерефталатных волокон свыше 0,3 с практически не влияет на разрывное усилие и толщину шва. При воздействии ультразвуком от 0,2 до 0,5 с существенных изменений в структуре зоны шва не происходит. Этим объясняется незначительное изменение разрывного усилия с увеличением времени воздействия ультразвуком. Кроме того, понижение прочности соединений ВХ может быть связано с макродефектами в сварных швах.

Дополнительными параметрами режима сварки НТМ является состав материалов, из которых изготовлены волноводы и опора, а также их форма и размеры, оказывающие меньшее по сравнению с основными параметрами влияние на разрывное усилие сварных швов.

При длительной работе вследствие гистерезисных потерь механической энергии происходит неизбежный нагрев волновода. В работе [2]

установлено, что температура разогрева волноводов, выполненных из сталей различных марок, может достигать 50...60 °С, поэтому обычно при выборе материала волновода исходят из обеспечения в нем наименьших потерь механической энергии. Этому требованию соответствуют наиболее упругие и легкие материалы — алюминиевые и титановые сплавы. Кроме того, при выборе материала волновода следует учитывать его усталостные свойства.

Для исследования влияния материала волновода на прочностные характеристики при сварке ВХ рассчитали и изготовили ножевые волноводы из стали 45, дюралюминия Д16Т и титанового сплава ВТ5. Все волноводы имели экспоненциальный профиль и рассчитывали для частоты $f = 22$ кГц из условия получения оптимального значения $A = 30$ мкм.

Из результатов испытаний сварных швов следует, что разрывное усилие швов, выполненных волноводами из сплавов Д16Т и ВТ5, практически одинаково. Сварка стальным волноводом привела к снижению разрывного усилия сварных швов почти на 10 %. Это можно объяснить ухудшением теплоотвода из зоны сварки в стальной волновод, так как он в процессе работы сварочно-акустического узла сильно разогревается. Поэтому для сварки ВХ не следует применять стальные волноводы.

Для исследования влияния формы, материала и размеров опоры на качество и прочность сварных швов проводили опытную сварку НТМ с использованием пластин-опор, толщиной от 5 до 30 мм, изготовленных из стали 45, алюминиевого сплава Д16Т и текстолита. Эксперименты показали, что форма опоры практически не влияет на разрывное усилие. В то же время материал опоры оказывает существенное влияние на этот показатель. Так, сварка на текстолитовой опоре, по сравнению со сваркой на металлической опоре, приводит к понижению разрывного усилия шва почти на 15 %. Увеличение толщины опорной плиты свыше 20 мм нецелесообразно, так как это не приводит к повышению разрывного усилия сварного шва.

Снижение разрывного усилия швов при использовании стальных волноводов и опор из материалов с малой теплопроводностью можно объяснить ухудшением теплоотвода из зоны сварки и перегревом материала шва.

С помощью УЗС можно получить нетканые полотна из холстов, состоящих не только из

термопластичных волокон, но и из их смеси с хлопковыми, вязкими, шерстяными и другими нетермопластичными волокнами. В этом случае расплавленная термопластичная составляющая обволакивает нетермопластичные волокна, тем самым образуя прочное соединение.

Эксперименты показали, что с увеличением содержания вязких волокон прочность падает практически линейно. Предельно допустимое содержание вязких волокон составляет 65 %. При большем содержании вязких волокон практически не удается получить прочные сварные швы.

Разработанные НТМ по своей структуре близки к нашедшим широкое применение фильтровальным материалам из ультратонких волокон (стеклянная ткань из ультратонкого стеклянного волокна, материала ФП и др.), поэтому они могут быть использованы, в частности, для фильтрации газовых сред от аэрозолей.

Полученные НТМ также превосходят применяемые в качестве предварительных фильтров тканые материалы, некоторые сетки, фильтр-сукно, рукавные ткани и др.

Выводы

1. Наиболее приемлемой для изготовления НТМ с помощью УЗС волокнистых холстов является схема контактной прессовой шовно-шаговой сварки, позволяющая исключить деформации и разрывы ВХ при сварке и транспортировке материала, а также создать универсальное сварочное оборудование.

2. В процессе ультразвукового воздействия наиболее интенсивно разогреваются слои ВХ, прилегающие к волноводу, поэтому оптимальной является толщина ВХ, соответствующая поверхностной плотности, равной 0,4 кг/м².

3. Для образования прочного сварного соединения наибольшее количество нетермопластичных добавок не должно превышать 65 % общего количества волокон в холсте.

4. Результаты исследования позволяют рекомендовать следующие оптимальные режимы сварки холстов, сформированных из полипропиленовых волокон — $A = 30$ мкм, $p_{ст} = 3,5$ МПа, $t_{св} = 0,25$ с; полиэтиленерефталатных волокон — $A = 35$ мкм, $p_{ст} = 2,7$ МПа, $t_{св} = 0,34$ с. В первом случае разрывное усилие сварного шва составляет 350 Н, во втором — 115 Н.

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Волков С.С., Соколов В.А., Шестель Л.А. Технология и оборудование для сварки эластичных емкостей из пленочного фторопласта-4МБ. *Сварка и диагностика*, 2013, № 3, с. 52–55.
- [3] Маслов Б.Г., Выборнов А.П. *Производство сварных конструкций*. Москва, Академия, 2015. 288 с.
- [4] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26 (10), pp. 796–799.
- [5] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.
- [6] Коновалов А.В., Неровный В.М., Куркин А.С., Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория сварочных процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.
- [7] Volkov S.S. Ultrasonic cutting with simultaneous welding of plastic components. *Welding International*, 2012, vol. 26 (4), pp. 322–324.
- [8] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Welding International*, 2013, vol. 27 (3), pp. 63–66.
- [9] Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология*. Санкт-Петербург, Профессия, 2008. 560 с.
- [10] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Welding International*, 2013, vol. 27 (1), pp. 163–166.

References

- [1] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiia publ., 2001. 376 p.

- [2] Volkov S.S., Sokolov V.A., Shestel' L.A. Tekhnologiya i oborudovanie dlia svarki elastichnykh emkosteï iz plenochnogo fluoroplasta-4MB [Problem rise of quality of weld on film from fluoroplastic, use for manufacture elastic capacity for system analysis gas industrial origin]. *Svarka i diagnostika* [Welding and diagnostics]. 2013, no. 3, pp. 52–55.
- [3] Maslov B.G., Vybornov A.P. *Proizvodstvo svarnykh konstruksii* [Production of welded structures]. Moscow, Akademiia publ., 2015. 288 p.
- [4] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26 (10), pp. 796–799.
- [5] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt-Peterburg, Politekhnikeskii universitet publ., 2013. 646 p.
- [6] Konovalov A.V., Nerovnyi V.M., Kurkin A.S., Makarov E.L., Iakushin B.F. *Teoriia svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Bauman Press, 2007. 752 p.
- [7] Volkov S.S. Ultrasonic cutting with simultaneous welding of plastic components. *Welding International*, 2012, vol. 26 (4), pp. 322–324.
- [8] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Welding International*, 2013, vol. 27 (3), pp. 63–66.
- [9] Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoïstva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: structure, properties, technology]. St. Petersburg, Professii publ., 2008. 560 p.
- [10] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Welding International*, 2013, vol. 27 (1), pp. 163–166.

Статья поступила в редакцию 25.03.2016

Информация об авторах

ВОЛКОВ Станислав Степанович (Москва) — кандидат технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: map@bmstu.ru).

ДЕРЯБИН Алексей Александрович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aad1_2000@mail.ru).

ШЕСТЕЛЬ Леонид Александрович (Омск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр-т Мира, д. 11, e-mail: weldtechn@mail.ru).

Information about the authors

VOLKOV Stanislav Stepanovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).

DERYABIN Aleksey Aleksandrovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aad1_2000@mail.ru).

SHESTEL Leonid Aleksandrovich (Omsk) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Equipment and Technology of Welding Production. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: weldtechn@mail.ru).