

УДК 621.791.16

Влияние параметров режима ультразвуковой сварки на прочностные характеристики нетканых материалов

С.С. Волков, А.В. Сударев, А.С. Панкратов, Н.В. Коберник

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Influence of the ultrasonic welding mode parameters on strength characteristics of the bonded fabric

S.S. Volkov, A.V. Sudarev, A.S. Pankratov, N.V. Kobernik

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены технологические процессы изготовления нетканых материалов, заключающиеся в получении волокнистых холстов и создании между волокнами прочных связей с помощью ультразвуковой сварки. Волокнистый холст может состоять из полипропилена, лавсана и капрона. Установлено, что разогрев волокнистых материалов при ультразвуковой сварке протекает без теплообмена с внешней средой. Происходит частичное размягчение поверхности волокон, которые расположены в слоях, прилегающих к волноводу. Волокна, расположенные в слоях, прилегающих к волноводу, полностью переходят в вязкотекучее состояние, и размягченный термопластичный полимерный материал вдавливаются статическим сварочным давлением во внутренние слои холста, скрепляя их. В результате происходит полный переход термопластичного материала между волноводом и опорой в вязкотекучее состояние. Сварной шов приобретает вид прозрачной пленки и имеет хорошую прочность. Экспериментально установлены оптимальные параметры режима сварки волокнистых холстов, обеспечивающие наибольшую прочность сварного шва. Исследовано влияние отклонения параметров режима от оптимальных значений на прочность и качество сварного шва. Определены дополнительные параметры режима ультразвуковой сварки волокнистых нетканых материалов.

EDN: ASKPSR, <https://elibrary/askpsr>

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, нетканый материал, амплитуда колебаний волновода, статическое сварочное давление, сварные соединения, волокнистый холст

The paper considers technological processes in manufacturing the bonded fabric that consists in obtaining the nonwoven webs and creating strong bonds between the fibers using ultrasonic welding. The web could include polypropylene, lavsan and capron. The paper shows that the nonwoven fabric is heated during the ultrasonic welding without heat exchange with the external environment. Fiber surface located in the layers adjacent to the waveguide is partially softened. The fibers located in the layers adjacent to the waveguide are passing completely into the viscous-flow state. The welding pressure indents the softened thermoplastic polymer material into the web inner layers and bonds them. As a result, the thermoplastic material between the waveguide and the support completely passes to the viscous-flow state. The weld seam takes the form of a transparent film and provides good strength. The paper establishes the experimentally obtained optimal parameters of the nonwoven web welding modes ensuring the welded seam highest strength. It analyzes the influence of the mode parameters deviation from the optimal values on the welded seam

strength and quality. Additional parameters of the nonwoven bonded fabric ultrasonic welding mode are determined.

EDN: ASKPSR, <https://elibrary/askpsr>

Keywords: ultrasonic welding, nonwoven fabric, waveguide oscillation amplitude, static welding pressure, welded joints, fibrous canvas

Сварка волокнистых нетканых материалов.

В последние годы все большее распространение получают изделия из химических волокон, в частности нетканые материалы (НМ), обладающие хорошими фильтровальными свойствами и высокой прочностью. Сущность технологических процессов изготовления НМ заключается в получении волокнистых холстов (ВХ) и создании между волокнами достаточно прочных связей [1–3].

Холст — определенным образом сформированный слой из равномерно распределенных не скрепленных волокон [1, 2], который может состоять из термопластичных волокон (полипропилена, капрона, лавсана и др.) или из их смеси с хлопком, вискозой, шерстью и другими нетермопластичными волокнами [2, 3].

Так как ВХ характеризуются большим коэффициентом затухания, их можно скреплять по схеме контактной ультразвуковой сварки (УЗС) [3, 4].

Для непрерывного выполнения процесса наиболее приемлем способ шовно-шаговой УЗС, являющейся разновидностью прессовой сварки, с шаговым перемещением материала. Эта схема УЗС предотвращает деформации и разрывы не скрепленного ВХ как при сварке, так и при транспортировании готового материала на заданный шаг.

Схемы расположения сварных швов (СШ) при изготовлении нетканых полотен и свар-

ных ножевых волноводов — инструментов (далее волноводы) приведены на рис. 1. Укладку СШ можно выполнять в направлении, перпендикулярном продольной оси ВХ, и под острым углом к ней (рис. 1, а, б). Протяженные СШ получают, используя несколько сварочных головок, установленных так, чтобы обеспечивалось необходимое перекрытие СШ (рис. 1, в).

Благодаря высокой воздухопроницаемости и значительной прочности НМ полученные ВХ можно использовать в качестве фильтровальных материалов для фильтрации газовых сред от аэрозолей [1, 2, 4].

Первые эксперименты по сварке ВХ разного развеса, сформированных полностью из термопластичных волокон (полипропиленовых и лавсановых), проведенные в режимах, применяемых для сварки сплошных полимерных материалов, не дали положительных результатов. Поэтому возникла необходимость определить влияние параметров режима УЗС на прочностные характеристики волокнистых НМ, в частности ВХ.

Прочность волокнистых НМ, а также производительность и стабильность процесса их изготовления с помощью УЗС зависят от многих факторов, совокупность которых можно назвать параметрами этого процесса [2, 5].

Рассмотрим факторы, от которых зависит прочность НМ, для чего представим ВХ как си-

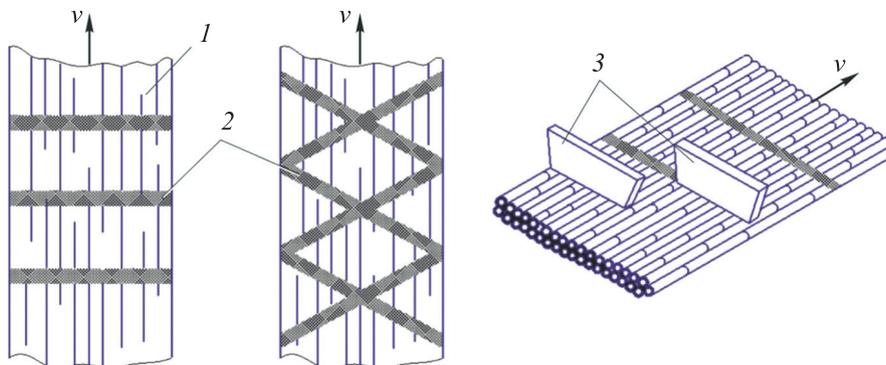


Рис. 1. Схемы расположения СШ при изготовлении нетканых полотен (а, б) и сварных ножевых волноводов (в):

1 — волокнистый лист; 2 — СШ; 3 — ножевые волноводы;
v — скорость перемещения волокна и волновода

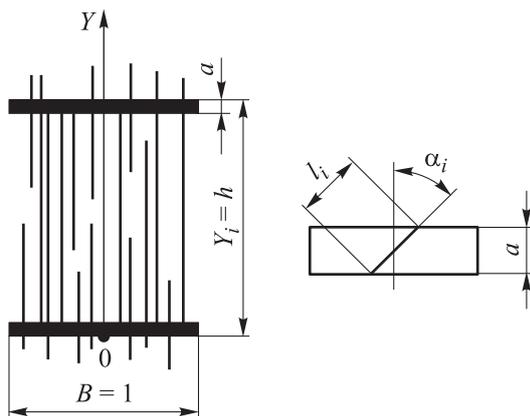


Рис. 2. Схема элементарной ячейки ВХ:
 a — ширина СШ; α_i — угол ориентации;
 l_i — длина одного волокна в пределах СШ

стему волокон длиной L , вытянутых вдоль оси Y (рис. 2).

Чтобы придать ВХ прочность вдоль этой оси, его необходимо скрепить швами, расположенными перпендикулярно волокнам. Если принять, что волокна распределены вдоль оси Y случайно и через СШ независимо от его ординаты Y_i проходит одно и то же количество волокон N , то можно считать, что все СШ, выполненные в одном и том же режиме, геометрически одинаковые и имеют одну и ту же прочность. Для этого выделим элементарную ячейку, представляющую собой два СШ шириной $B = 1$, между которыми закреплено N волокон (см. рис. 2). Если расстояние между СШ h будет больше, чем длина волокон L , то число закрепленных волокон N и прочность НМ будут равны нулю.

Следовательно, прочность элементарной ячейки будет зависеть главным образом от расстояния между СШ, так как с его изменением меняется число и, соответственно, суммарная прочность закрепленных волокон.

В то же время, если суммарная прочность волокон, закрепленных между двумя соседними СШ, окажется больше, чем у СШ или зоны перехода от волокон к СШ, то при приложении растягивающей нагрузки разрыв произойдет по одной из этих зон. Так как прочность СШ и зоны перехода определяются сварочным циклом и режимом УЗС, последние также будут являться параметрами процесса изготовления НМ [6, 7].

Параметры режима УЗС. При УЗС полимерных материалов параметры режима принято подразделять на основные и дополнительные.

К основным параметрам следует отнести амплитуду колебаний рабочего торца волновода (далее амплитуда колебаний волновода) A , статическое сварочное давление (далее статическое давление) $p_{ст}$ и продолжительность ультразвуковых (УЗ) колебаний (время сварки) $t_{св}$. Эти параметры непосредственно влияют на УЗ-энергию, вводимую в свариваемый материал, а следовательно, определяют возможность разогрева зоны сварки до необходимой температуры.

Частота УЗ-колебаний f не варьировалась, так как это связано с определенными техническими трудностями. Изменение частоты колебаний в диапазоне 18...30 кГц, который обычно используют для УЗС полимерных материалов, почти не влияет на прочность СШ при условии правильного подбора других основных и дополнительных параметров режима УЗС [4, 6, 7].

Дозировать вводимую энергию легче всего путем регулирования продолжительности УЗ-колебаний. Однако для изготовления НМ на основе ВХ можно применять и схему сварки с фиксированной осадкой, которую также можно считать основным параметром [4, 8].

К дополнительным параметрам режима УЗС относятся те, с помощью которых можно регулировать непроизводительно затрачиваемую энергию. Это передаваемая в опору механическая энергия и теплота, переходящая от разогретой зоны сварки в холодные волновод и опору. Также в качестве дополнительных параметров выступают размер, форма и материал опоры и волноводов, материал теплоизоляционных прокладок, материал волокон, развес ВХ и т. д. [5, 6].

Цель работы — определение оптимального сочетания параметров режима УЗС, обеспечивающего наибольшую прочность СШ, и, выявление связи между прочностью свариваемого материала и расстоянием между двумя соседними СШ.

При исследовании влияния одного из параметров другие поддерживались на оптимальном уровне.

Отклонения основных параметров режима УЗС от оптимальных значений. С практической точки зрения важно знать, как сильно влияют отклонения основных параметров режима УЗС от оптимальных значений на разрывное усилие сварных соединений НМ. Это в первую очередь связано с необходимостью вве-

дения в сварочные установки дополнительных устройств, предназначенных для корректировки параметров режима в процессе УЗС, в тех случаях, когда предъявляются достаточно жесткие требования к прочности, однородности и стабильности сварного соединения [8, 9].

Отклонения основных параметров режима УЗС от оптимальных значений могут быть вызваны различными причинами. Например, статическое давление $p_{ст}$ может меняться вследствие большой инерции элементов механизма сжатия или непостоянства сил трения в механизме давления. Если давление осуществляют пружинные механизмы, то оно способно меняться и в результате осадки разогретого НМ под волноводом.

Это необходимо учитывать при сварке полотен разной толщины с ограничением ввода УЗ-энергии по продолжительности УЗ-колебаний. Так как в процессе изготовления НМ трудно добиться однородности ВХ по толщине, для создания статического давления следует применять пневматические или гидравлические системы. Изменение амплитуды колебаний волновода A чаще всего обусловлено выходом акустической системы из резонанса [4].

Амплитуда колебаний волновода. Регулирование амплитуды колебаний волновода в процессе УЗС не представляет сложности. Обычно оно осуществляется подбором напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения магнитострикционного преобразователя, изменением напряжения возбуждения генератора (например, в генераторах УЗГ6-1,6 и УЗГ5-1,6) или напряжения анодного высоковольтного выпрямителя (в генераторах УЗГ2-4 и УЗГ1-1).

Однако измерять и контролировать амплитуду колебаний волновода в процессе УЗС достаточно сложно, так как приборы для ее контроля позволяют проводить замеры, когда рабочий торец волновода не поджат к свариваемому изделию.

Амплитуду колебаний волновода можно измерять двумя способами. Первый — с помощью оптических приборов, когда измеряют величину колебания специальных меток, нанесенных на рабочий торец волновода, находящихся в поле зрения измерительного микроскопа. Эта величина будет равна двойной амплитуде колебаний волновода. Второй — с помощью пьезо- или тензодатчиков, которые можно наклеить в разные точки колебатель-

ной системы. В последнем случае измеряется электродвижущая сила наклеенного датчика, по которой после предварительной тарировки, можно судить об амплитуде колебаний волновода [4].

Для контроля амплитуды колебаний волновода применяли первый метод. Статическое давление создавали с помощью пневматической системы и контролировали по манометру после предварительной тарировки его показаний на величину усилия. Для контроля продолжительности УЗ-колебаний использовали электронный секундомер.

Все опыты проводили на лабораторной установке УЗП-1, разработанной на кафедре «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, с использованием магнитострикционного преобразователя мощностью 1,5 кВт и резонансной частотой 22 кГц. УЗС выполняли по циклу статическое давление — УЗ-колебания с помощью ножевых ступенчатых волноводов с рабочим торцом длиной 240...280 мм, рассчитанных на эту частоту и обеспечивающих амплитуду колебаний волновода $A = 30$ мкм.

Амплитуду колебаний волновода измеряли оптическим методом на ненагруженном волноводе, т. е. на холостом ходу. Подлежащие сварке ВХ изготавливали с продольной ориентацией волоком на чесальных машинах. Прочность определяли как разрывное усилие образцов в виде полоски шириной 5 мм и длиной рабочей части 35 мм, вырезанной из СШ.

Увеличение амплитуды колебаний волновода относительно оптимального значения приводит к значительному разогреву полимерного материала непосредственно под волноводом. Это, как правило, вызывает деструкцию, появление пузырьков, выпучиваний и выплесков размягченного материала. После окончания УЗС поверхность СШ оказывается неровной и пористой, имеет наплывы и другие дефекты. В результате прочность сварочного соединения снижается [8, 9].

Уменьшение амплитуды колебаний волновода относительно оптимального значения также приводит к снижению прочности. В этом случае количества вводимой УЗ-энергии недостаточно для образования сварного соединения, требуется значительное увеличение времени сварки, что также приводит к излишнему нагреву полимерного материала под волноводом и уменьшению прочности [9, 10].

При изготовлении НМ оптимальная амплитуда колебаний волновода должна находиться в пределах 30...50 мкм, чего можно достичь с помощью правильно спроектированной колебательной системы, обеспечивающей необходимый коэффициент усиления [4, 5].

При проведении экспериментов в одних и тех же условиях всегда имеется некоторый разброс результатов, что связано с невозможностью учета всех факторов, влияющих на процесс. Так, при УЗС отклонения от режима могут быть вызваны колебаниями напряжения питающей сети, нагревом волновода, изменением статического давления, выходом колебательной системы из резонанса и т. д. Эти отклонения отразятся на прочности СШ, получаемых в каждом конкретном опыте.

Кроме того, различные значения прочности могут быть обусловлены неоднородностью распределения волокон в НМ, их геометрической неоднородностью и другими факторами. Для изготовления НМ желательно применять волноводы с достаточно большой длиной рабочего торца, что позволяет уменьшить число сварочных головок, необходимых для получения заданной ширины НМ.

В разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана установке использованы волноводы с рабочим торцом длиной 240...280 мм. Благодаря значительной длине рабочего торца такие волноводы имеют небольшой коэффициент усиления и амплитуду колебаний волновода на выходе не более 30 мкм. Поэтому в качестве нижнего и верхнего уровней ее варьирования выбраны 25 и 30 мкм [10–12].

Статистическое сварочное давление. Влияние статистического давления $p_{ст}$ на процесс УЗС полимерных материалов изучено недостаточно. Однако несомненным является то, что с помощью давления $p_{ст}$ обеспечивается необходимый акустический контакт между материалом и волноводом [11].

УЗС при малом статическом давлении, как правило, приводит к снижению прочности из-за плохого акустического контакта и, следовательно, малой УЗ-энергии, вводимой в свариваемый материал. Если статическое давление больше оптимального значения, то прочность также падает.

Можно предположить, что при УЗС с большим статическим давлением нарушается резонансный режим работы акустического узла.

При расчете волновода его рассматривают как стержень, свободный на одном конце и нагруженный гармоническим воздействием на другом. При достаточно большом статическом давлении (более 5...6 МПа) колебательную систему можно рассматривать как заземленную со стороны рабочего торца волновода. Это приводит к рассогласованию системы генератор — акустический узел, вследствие чего резко уменьшается амплитуда колебаний волновода [12, 13].

При УЗС ножевым волноводом, работающим от ферритового преобразователя, наблюдается заметное снижение амплитуды колебаний волновода уже при $p_{ст} > 2$ МПа. При УЗС точечным или ножевым волноводом, работающим от никелевого магнитострикционного преобразователя, уменьшение A с повышением статического давления становится заметным при $p_{ст} > 5$ МПа.

Так как ВХ в свободном состоянии имеют рыхлую структуру, для обеспечения акустического контакта при их сварке необходимо использовать большее статическое давление, чем при УЗС сплошных полимерных материалов. Влияние продолжительности УЗ-колебаний на прочность СШ аналогично влиянию амплитуды колебаний волновода и статического давления. Увеличение продолжительности УЗ-колебаний приводит к возрастанию прочности СШ до достижения определенного максимума, затем она падает [14, 15].

Чрезмерная продолжительность УЗ-колебаний вызывает существенное утонение зоны СШ под действием статического давления и амплитуды колебаний волновода. Снижение прочно-

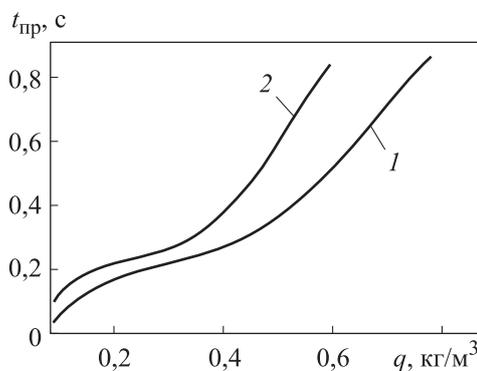


Рис. 3. Зависимости времени полного проплавления $t_{пр}$ полипропиленовых (1) и лавсановых (2) волокон от поверхностной плотности ВХ q при амплитуде колебаний волновода $A = 27$ мкм и статическом давлении $p_{ст} = 4$ МПа

сти обусловлено уменьшением сечения и наличием подрезов в корне СШ. Продолжительность УЗ-колебаний при сварке волокнистых НМ существенно зависит от поверхностной плотности ВХ.

Как видно из рис. 3, увеличение поверхностной плотности ВХ из полипропиленовых и лавсановых волокон более $0,4 \text{ кг/м}^2$ является нецелесообразным с точки зрения производительности. При этом уровни варьирования продолжительности УЗ-колебаний приняты равными 0,2 и 0,8 с.

Рабочий цикл УЗС. Прочность СШ при УЗС зависит не только от основных параметров режима, но и от параметров рабочего цикла, т. е. от последовательности приложения и снятия статического давления, включения, прохождения и выключения УЗ-колебаний. В процессе УЗС статическое давление может оставаться постоянным или изменяться по определенному циклу. Рабочий цикл также закладывают в основу выбора принципиальной схемы механизма статического давления и включения УЗ-колебаний [14, 15].

Для сварки волокнистых НМ наиболее приемлемым является рабочий цикл (статическое давление — УЗ-колебания), приведенный на рис. 4, где $t_{\text{п}}$ и t_3 — время предварительного сжатия и запаздывания; $t_{\text{уЗ}}$ — продолжительность УЗ-колебаний. Согласно этому циклу, статическое давление $p_{\text{ст}}$ прикладывается до включения УЗ-колебаний, остается постоянным до конца УЗС и снимается с запаздыванием на время t_3 . Охлаждение СШ начинается, когда материал сжат между волноводом и опорой, и заканчивается, как правило, на воздухе.

Охлаждение под действием статического давления существенно влияет на повышение прочности СШ. Время запаздывания t_3 не должно превышать 0,05 с. Если выключение УЗ-колебаний происходит при снятом статическом давлении, то качество СШ резко ухудшается вследствие вспучивания поверхности СШ и гофров.

При сварке ВХ наблюдается явление автостабилизации толщины СШ, что можно объяснить следующим образом. В процессе термоползучести и вытеснения пластифицированного материала происходит приближение холодного рабочего торца волновода к зоне максимального тепловыделения. Это вызывает увеличение теплоотвода из сварочной зоны [9, 13].

При некотором определенном значении остаточной толщины СШ устанавливается динамическое равновесие между тепловыделением и теплоотводом или даже количество отводимой теплоты превалирует над количеством теплоты, выделяемым вследствие гистерезисных потерь. В результате температура в сварочной зоне становится ниже, чем температура в вязкотекучем состоянии, и дальнейшее утонение СШ прекращается.

Это подтверждается тем, что с увеличением значения того или иного параметра разрывное усилие СШ не уменьшается до нуля [9, 10]. Так как изменение разрывного усилия в основном обусловлено утонением НМ, остаточная толщина СШ не изменяется при УЗС в этих режимах. Снижение разрывного усилия с ростом параметра УЗС относительно оптимального значения нельзя объяснить только утонением СШ. Разрывное усилие с увеличением времени УЗС от 0,3 до 0,4 с становится меньше почти

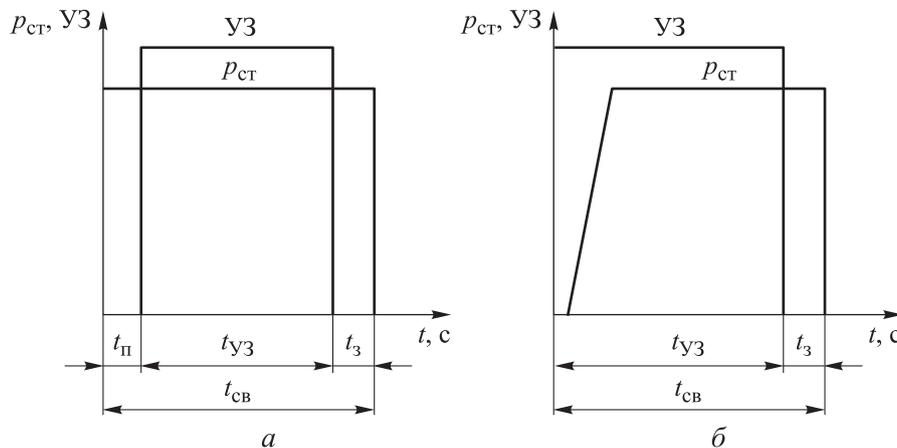


Рис. 4. Рабочие циклы при УЗС

в 6 раз, в то время как толщина СШ снижается только в 2 раза.

Такой характер рассматриваемых кривых связан со структурными изменениями, происходящими в волокнистом НМ под действием УЗ-колебаний, что подтверждено результатами рентгеновского анализа СШ.

Материал волновода. Дополнительные параметры режима — материал, из которого изготовлены волноводы и опоры, их форма и размеры — оказывают меньшее влияние на разрывное усилие СШ, чем основные параметры.

При продолжительной работе вследствие гистерезисных потерь УЗ-энергии происходит неизбежный нагрев волновода. По результатам эксперимента установлено, что температура нагрева волноводов, выполненных из различных сталей, может достигать 50...60 °С [9, 11]. Поэтому обычно при выборе материала волновода исходят из обеспечения наименьших потерь УЗ-энергии в нем. Этому требованию наиболее соответствуют упругие и легкие материалы — алюминиевые и титановые сплавы. Кроме того, при выборе материала волновода следует учитывать его усталостные свойства [14, 15].

Для изучения влияния материала волновода на прочностные характеристики СШ при сварке ВХ изготавливали ножевые волноводы из стали 45, алюминиевого сплава Д16Т и титанового сплава ВТ-5. Все волноводы имели экспоненциальный профиль и рассчитывали на частоту $f = 22$ кГц из условия получения оптимальной амплитуды колебаний волновода $A = 30$ мкм.

В процессе сварки НМ при температуре внешней среды 23 °С волновод из стали 45 нагревали до температуры 60 °С, волновод из алюминиевого сплава Д16Т — до 30 °С, волновод из титанового сплава ВТ-5 — до 38 °С.

По результатам испытаний СШ установлено, что разрывное усилие СШ, сваренных волноводами из Д16Т и ВТ-5, практически одинаковое. УЗС волноводом из стали 45 привела к падению разрывного усилия СШ 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. Дозирование вводимой энергии ограничивалось продолжительностью УЗ-колебаний, поэтому ухудшение теплоотвода привело к перегреву зоны сварки и, соответ-

ственно, к снижению разрывного усилия. Очевидно, что более продолжительная работа акустического узла может вызвать еще большее уменьшение прочности. В связи с этим для сварки ВХ не следует применять стальные волноводы.

Чтобы определить влияние формы, материала и размеров опоры на качество и прочность СШ, проводили опытную сварку образцов с использованием пластин толщиной 5...30 мм, изготовленных из стали 45, Д16Т и текстолита. Анализ результатов экспериментов показал, что вид и форма опоры практически не влияют на разрывное усилие СШ, а материал опоры оказывает существенное влияние на этот показатель. Так, УЗС на текстолитовой опоре привела к снижению разрывного усилия почти на 15 %, что связано с ухудшением теплоотвода в опору из зоны сварки и перегревом материала СШ [12, 13].

Дальнейшие эксперименты выполняли на опорах, представляющих собой пластины из стали 45 толщиной 5...30 мм. Увеличение толщины опоры более 25 мм не вызвало повышения разрывного усилия СШ. Следует отметить, что при использовании более тонкой опорной плиты качество СШ ухудшается, вследствие чего трудно добиться стабильности результатов.

По полученным результатам определен следующий оптимальный режим сварки ВХ из полипропиленовых и лавсановых волокон: $A = 30$ мкм, $p_{ст} = 2,6$ МПа и $t_{св} = 0,33$ с. Такой режим обеспечивает расчетное разрывное усилие СШ, равное 110 Н.

Нетканые полотна можно получить УЗС холстов, состоящих из смеси термопластичных волокон с хлопковыми, вязкими, шерстяными и другими нетермопластичными волокнами. В этом случае расплавленная термопластичная составляющая обволакивает нетермопластичные волокна, тем самым образуя прочное соединение [1, 3].

Эксперименты показали, что с увеличением содержания вязких волокон прочность падает практически линейно. Предельно допустимое содержание вязких волокон составило 65 %. При их большем содержании не удалось получить прочные СШ.

По структуре полученные НМ близки к нашим широкое применение фильтровальным материалам из ультратонких волокон, вследствие чего их можно использовать для фильтрации газовых сред от аэрозолей.

Выводы

1. Для изготовления НМ сваркой ВХ следует применять схему контактной прессовой шовно-шаговой УЗС, позволяющей исключить деформации и разрывы ВХ как при сварке, так и при транспортировании материала.

2. В процессе УЗ-воздействия наиболее интенсивно разогреваются слои ВХ, прилегающие к волноводу. В связи с этим время полного

проплавления изменяется незначительно, если толщина ВХ сравнима с таковой вязкотекучей прослойки, образующейся под волноводом в начальный период УЗС.

3. Наибольшее количество нетермопластичных добавок не должно превышать 65 % общего количества волокон в ВХ.

4. Для УЗС наиболее приемлемы волноводы, выполненные из алюминиевых и титановых сплавов.

Литература

- [1] Крыжановский В.К., ред. *Технические свойства полимерных материалов*. Санкт-Петербург, Профессия, 2005. 235 с.
- [2] Люшинский А.В. *Диффузионная сварка разнородных материалов*. Москва, Академия, 2006. 203 с.
- [3] Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. Москва, Научный мир, 2007. 576 с.
- [4] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [5] Комаров Г.В. *Способы соединений деталей из пластических масс*. Москва, Химия, 1979. 286 с.
- [6] Волков С.С. Влияние режима ультразвуковой шовной сварки полимерных пленок на образование швов и производительность процесса. *Сварочное производство*, 2013, № 11, с. 38–42.
- [7] Волков С.С., Коновалов А.В., Выборнов А.П. Методика расчета параметров режима ультразвуковой сварки изделий из полимерных материалов. *Сварка и диагностика*, 2016, № 2, с. 35–39.
- [8] Алешин Н.П., Чернышов Г.Г., ред. *Сварка. Резка. Контроль*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2004. 624 с.
- [9] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического ун-та, 2013. 646 с.
- [10] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Weld. Int.*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 898–902, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581433>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic welding of brush elements. *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>
- [12] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of non-woven materials. *Weld. Int.*, 2005, no. 19, no. 6, pp. 484–489, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3473>
- [13] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Weld. Int.*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 482–486, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3154>
- [14] Volkov S.S., Shestel' L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 150–154, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1036535>
- [15] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>

References

- [1] Kryzhanovskiy V.K., ed. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. Sankt-Peterburg, Professiya Publ., 2005. 235 p. (In Russ.).
- [2] Lyushinskiy A.V. *Diffuzionnaya svarka raznorodnykh materialov* [Diffusion welding of dissimilar materials]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 203 p. (In Russ.).

- [3] Tager A.A. *Fiziko-khimiya polimerov* [Physical chemistry of polymers]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2007. 576 p. (In Russ.).
- [4] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 376 p. (In Russ.).
- [5] Komarov G.V. *Sposoby soedineniy detaley iz plasticheskikh mass* [Methods of joints of details from plastic masses]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 286 p. (In Russ.).
- [6] Volkov S.S. Effect of ultrasonic seam mode welding of polymer films on formation of seams and productivity of process. *Svarchnoe proizvodstvo*, 2013, no. 11, pp. 38–42. (In Russ.).
- [7] Volkov S.S., Konovalov A.V., Vybornov A.P. Methodology for calculating the parameters of ultrasonic welding mode of products from polymeric materials. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2016, no. 2, pp. 35–39. (In Russ.).
- [8] Aleshin N.P., Chernyshov G.G., eds. *Svarka. Rezka. Kontrol*. T. 1 [Welding. Cutting. Control. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 624 p. (In Russ.).
- [9] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes at welding]. Sankt-Peterburg, Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta Publ., 2013. 646 p. (In Russ.).
- [10] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Weld. Int.*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 898–902, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581433>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic welding of brush elements. *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>
- [12] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of non-woven materials. *Weld. Int.*, 2005, no. 19, no. 6, pp. 484–489, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3473>
- [13] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Weld. Int.*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 482–486, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3154>
- [14] Volkov S.S., Shestel' L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 150–154, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1036535>
- [15] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>

Статья поступила в редакцию 05.03.2025

Информация об авторах

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

СУДАРЕВ Алексей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sudarev@bmstu.ru).

Information about the authors

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

SUDAREV Alexey Vladimirovich — Senior Lecturer, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sudarev@bmstu.ru).

ПАНКРАТОВ Александр Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aspankratov@bmstu.ru).

PANKRATOV Alexander Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aspankratov@bmstu.ru).

КОБЕРНИК Николай Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: koberniknv@bmstu.ru).

KOBERNIK Nikolay Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: koberniknv@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Сударев А.В., Панкратов А.С., Коберник Н.В. Влияние параметров режима ультразвуковой сварки на прочностные характеристики нетканых материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 57–66.

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Sudarev A.V., Pankratov A.S., Kobernik N.V. Influence of the ultrasonic welding mode parameters on strength characteristics of the bonded fabric. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 57–66.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Активная система внутренней пассивной
безопасности автомобиля»**

**Авторы: А.В. Гонсалес Астуа, Р.Б. Гончаров,
А.В. Петюков**

Изложены основные принципы построения, применения и функционирования всех известных типов модулей подушек безопасности и натяжителей ремней, относящихся к системе внутренней пассивной безопасности автомобиля. Представлены физические и математические модели процессов функционирования этих устройств и их взаимодействия с антропоморфным манекеном при дорожно-транспортном происшествии, а также инженерные методики расчета параметров нагружения газогенераторов. Приведено описание процедур сертификации автомобилей на пассивную безопасность, анализа регламентов, сопровождающих разработку, испытания и эксплуатацию модулей подушек безопасности в соответствии с международными и российскими стандартами.

Для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства». Может быть также полезно аспирантам высших технических учебных заведений и инженерно-техническим работникам предприятий, занимающимся разработкой, производством и эксплуатацией автомобильной техники.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>