Исследование процесса и разработка технологии ультразвуковой сварки синтетических тканей

Research of the process and development of technology of ultrasonic welding of synthetic fabrics

С.С. ВОЛКОВ, В.М. НЕРОВНЫЙ, Г.А. БИГУС

S.S. VOLKOV, V.M. NEROVNY, G.A. BIGUS

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Bauman Moscow State Technical University

bauman@bmstu.ru

В работе проанализированы возможные способы соединения синтетических тканей на полимерной основе. Рассмотрены технологические возможности шовой ультразвуковой сварки синтетических тканей. Проведены эксперименты по свариваемости лавсановой, капроновой и полипропиленовой тканей. Определены основные параметры режима шовой ультразвуковой сварки синтетических тканей.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, синтетические ткани, статическое сварное давление, фиксированный зазор, амплитуда колебаний, волновод-инструмент

The paper analyzes the possible ways of joining of polymer-based synthetic fabrics. The technological capabilities of seam ultrasonic welding of synthetic fabrics are considered. Experiments on the weldability of polyester, nylon and polypropylene fabrics are carried out. The main parameters of the mode of seam ultrasonic welding of synthetic fabrics are determined.

Keywords: ultrasonic welding, synthetic fabrics, static welded pressure, the fixed gap, amplitude of fluctuations, a wave guide tool

DOI: 10.35164/0554-2901-2019-5-6-53-56

В настоящее время в промышленности и различных отраслях народного хозяйства широко используются синтетические ткани для изготовления белья и изделий бытового назначения, тяжелых морских канатов, рыболовных сетей, клиновидных и ленточных ремней, спецодежды, пожарных шлангов, тканей для нужд медицины, а также в химической, горнодобывающей, нефтеперерабатывающей промышленности и цветной металлургии [1, 2].

Успешное применение синтетических тканей обусловлено комплексом свойств, таких как высокие физико-механические показатели, минимальное водопоглощение, стойкость против воздействия агрессивных сред и повышенных температур, износоустойчивость и др. Благодаря этим свойствам синтетические ткани успешно конкурируют с натуральными. Наиболее распространенные синтетические ткани делятся на следующие группы по химическому строению составляющих их волокон: полиамидные (капрон, анид), полиэфирные (лавсан), полиакрилонитрильные (нитрон), полихлорвиниловые (хлорин) и полипропиленовые [2, 3].

До недавнего времени синтетические ткани соединяли нитками на швейных машинах. Однако такой способ соединения обладает существенными недостатками [1, 2]. Так, при ниточном соединении синтетических тканей, обладающих большой упругостью, неизбежно образование волнистости и гофров, что приводит к неудовлетворительному внешнему виду швов. При этом ткани морщатся и разрушаются, особенно если строчка идет по утку. При больших скоростях, когда нить проходит через ушко иглы со скоростью 0,3 м/с, происходит разогрев нити и ткани, обусловленный теплотой, выделяющейся при трении. Разогрев может быть настолько значительным, что приводит к оплавлению нити и ее обрыву. Попытки уменьшить разогрев за счет охлаждения иглы струей холодного воздуха и применения различных смазок иглы приводит к усложнению конструкции швейных машин, загрязнению тканей или коррозионному повреждению игл. Зачастую из-за дефицитности синтетических нитей синтетические ткани сшивают хлопчатобумажными нитями, вследствие чего значительно снижается прочность и ухудшаются эксплуатационные свойства соединений тканей. При соединении ряда тканей технического назначения, пропитанных с целью придания им специальных

свойств различными составами, а также при изготовлении изделий, где требуется герметичность соединения (например, фильтр для жидких и газовых сред), метод сшивания нитями становится вообще неприемлемым [1, 4, 5].

При пошиве одежды из синтетических материалов швейные нити должны иметь тот же химический состав, что и материал, в противном случае появляется морщинистость швов в процессе пошива или после стирки и чистки вследствие различной усадки нитей и тканей. Эти дефекты плохо устраняются последующей влажной и тепловой обработкой [1, 4].

В связи с перечисленными недостатками ниточных соединений все большее распространение получают безниточные способы соединения тканей: термоконтактная, высокочастотная и ультразвуковая сварка. Наиболее перспективным из способов является ультразвуковая сварка, которая позволяет устранить большую часть перечисленных недостатков при обеспечении требуемой прочности швов. Кроме того, отказ от использования в процессе соединения тканей швейных нитей исключает такие проблемы, как подбор нитей по диаметру иглы, толщине, цвету и химическому составу; перезаправку нитей при их обрыве или окончании; обрезание нитей и фиксацию их концов; положение иглы и др. [4, 6].

Одним из лучших способов ультразвуковой сварки, позволяющим изготавливать изделия из синтетических тканей с прямолинейными и криволинейными швами большой протяженности, является ультразвуковая шовная сварка [6, 7].

Согласно последней классификации способов ультразвуковой сварки, разработанной сотрудниками кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, сварка разделяется на прессовую и непрерывную. Прессовая сварка выполняется за одно рабочее движение волновода-инструмента. Таким способом получают точечные, прямолинейные и замкнутые швы различного контура. Непрерывная сварка классифицируется по следующим основным признакам: степени механизации, способу перемещения свариваемого материала и способу дозирования вводимой энергии [4, 7].

По степени механизации непрерывная сварка делится на ручную и механизированную. При ручной сварке сварные швы получают за счет перемещения сварочного узла вручную, а изделие закреп-

пляется на опоре неподвижно. При механизированной сварке, как правило, осуществляется перемещение свариваемого изделия, а сварочный узел остается неподвижным. При этом перемещение изделия осуществляется специальным механизмом.

В зависимости от способа свариваемого материала непрерывная сварка делится на шовно-шаговую и шовную. Шовно-шаговая сварка совмещает в себе пресовую сварку с перемещением свариваемого материала на определенный шаг. Величина шага выбирается такой, чтобы обеспечивалось перекрытие швов. При использовании схемы «на протяг» изделие протягивается между опорой и рабочим торцом волновода, соединенным с механизмом перемещения. При сварке по схеме «с вращающимся роликом-опорой» свариваемый материал перемещается специальным роликом, служащим одновременно и опорой [6, 8].

По способу дозирования вводимой механической энергии ультразвуковая сварка подразделяется на сварку с фиксированным зазором и с фиксированной осадкой. Схема с фиксированным зазором может применяться как для случая шовно-шаговой сварки, так и для шовной, а схема с фиксированной осадкой – только при шовно-шаговой.

Из всех приведенных способов наиболее часто для сварки синтетических тканей применяется ультразвуковая шовная сварка с фиксированным зазором. Этот способ сварки относительно прост, также позволяет регулировать скорость сварки и получать сварные соединения любой протяженности и конфигурации (рис. 1).

Рис. 1. Сварные соединения синтетических тканей, выполненные с помощью ультразвука: а – сварной шов; б – сварка петель; в – процесс ультразвуковой резки тканей.

В данной работе исследовали свариваемость лавсановой, капроновой и полипропиленовой тканей толщиной 600 мкм. При исследовании ультразвуковую сварку синтетических тканей проводили на непрерывной шовной сварочной установке с фиксированным зазором УПШ-12, разработанной на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 2). Особенность машины УПШ-12 состоит в том, что для повышения прочности сварного соединения за волноводом установлен прокатывающий ролик, укрепленный на кронштейне станины. Вследствие того, что ткани имеют большую теплоемкость и малый коэффициент теплоотдачи, сварной шов подходит к ролику еще не остывшим, поэтому прокатка происходит при повышенной температуре. В результате прокатки прочность сварного соединения повышается на 4–7% по сравнению с прочностью сварного шва, полученного без прокатки. Предусмотрено регулирование положения прокатывающего ролика в зависимости от толщины синтетической ткани, что позволяет при сварке прокатывать ткань с различной силой прижима. Установочный винт служит для регулирования зазора между торцом волновода и опорой до 5 мм. Машина УПШ-12 комплектуется пьезокерамическим преобразователем мощностью 0,4 кВт, частотой 22 кГц, работающим от ультразвукового генератора ИЛ10-0,4, разработанного фирмой «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ» (Санкт-Петербург). Генератор изготавливают с выходной мощностью от 100 Вт до 10 кВт на полевых транзисторах и с возможностью оперативного регулирования всех рабочих параметров. В

данной работе применяли генератор ИЛ10-0,4 мощностью 400 Вт, оснащенный плавной регулировкой акустической мощности, что очень важно при сварке синтетических тканей, цифровым частотомером и аналоговым индикатором резонанса акустической системы. Генератор имеет фазовую автоподстройку частоты и источник поляризации с выходным током до 30 А. Охлаждение генератора воздушное принудительное, рабочая частота 22 кГц.

Рис. 2. Сварочная машина УПШ-12: 1 – преобразователь; 2 – трансформатор упругих колебаний; 3 – волновод-инструмент; 4 – опора-ролик; 5 – рабочий стол; 6 – ограждение преобразователя; 7 – прокатывающий ролик; 8 – протягивающие ролики; 9 – установочный винт и гайка; 10 – станина; 11 – подвижная панель.

Масса генератора 6,2 кг. Генератор ИЛ10-0,4 позволяет выбирать режим работы ультразвукового оборудования для сварки синтетических тканей, при котором КПД акустического узла будет максимальным.

Машину УПШ-12 применяют для ультразвуковой сварки фильтровальных рубашек из синтетических тканей с длиной швов 2,5 м на горно-обогатительных фабриках. Она обеспечивает достаточную прочность. Машина работает без водяного охлаждения. Высокая эффективность машины обусловлена, в первую очередь, добротностью ультразвуковой пьезокерамической колебательной системы и малыми собственными потерями. Результаты исследования высокочастотных колебательных систем, применяемых для сварки синтетических тканей, позволили определить оптимальные режимы работы.

Оптимальными параметрами режима непрерывной шовной сварки являются: амплитуда колебаний рабочего торца волновода A (мкм), частота колебаний f' (кГц), скорость сварки V (м/с), и статическое сварочное давление $P_{ст}$ (МПа) или усилие прижима волновода к материалу $F(H)$. Такие параметры определяли в процессе шовной ультразвуковой сварки тканей трех видов: капрона, лавсана и полипропилена толщиной 600 мкм. В качестве параметра оптимизации выбрана прочность соединения на расслаивание.

При исследовании влияния одного из параметров режима сварки на прочность сварного соединения значения двух других параметров поддерживаются постоянными [8]. Варьируется одно какое-либо значение, в то время как остальные параметры остаются неизменными. Пределы изменения параметров определяются значениями, при которых выявляется максимум прочности свариваемых синтетических тканей. Последовательность выбора параметров для определения стабильности, наилучшего режима сварки может быть разной. Частота колебаний зависит от используемого генератора и, как правило, остается неизменной, т.е. порядка 22 кГц. Постоянные параметры в каждом случае подбираются методом последовательного приближения и близки к оптимальным. Например, $A = 30\text{--}40$ мкм, примерно в таких пределах лежат и значения оптимальных амплитуд для мощных магнитострикционных преобразователей. Амплитуда колебаний волновода A при сварке синтетических тканей различна, что можно объяснить их различной температурой плавления $T_{пл}$: у полипропиленовой ткани $T_{пл} = 165^\circ\text{C}$, капроновой – 215°C , лавсановой – 260°C [2, 8]. Оптимальные значения статического сварочного давления $P_{ст}$ для различных материалов примерно одинаковы и составляют около

2–4 МПа. На нашей установке сварочное давление создается путем зазора между волноводом и опорой, равного примерно половине суммарной толщины свариваемых синтетических тканей. Оптимальная скорость сварки V невелика: она составляет для всех тканей около 20 м/ч, в то время как на мощных установках скорость сварки доходит до 50 и даже до 100 м/ч. Увеличение скорости сварки V достигается обычно путем повышения статического сварочного давления $P_{ст}$, однако у высокочастотных колебательных систем повышение $P_{ст}$ ведет к резкому снижению амплитуды колебаний волновода. Дело в том, что с увеличением сварочного давления возрастает сопротивление акустической нагрузки, которая ввиду малого сопротивления собственных потерь таких систем начинает сильно сказываться на режиме работы сварочных установок [4, 6]. Таким образом, в условиях, когда требуется высокая производительность процесса, для сварки синтетических тканей нужно применять мощные источники питания (400 Вт и выше) и металлические магнотриксционные преобразователи.

Прочность сварных соединений синтетических тканей зависит также от материала, из которого изготовлен волновод и опора. Высота и форма опоры практически не влияют на прочность сварных соединений. При выборе материала волновода для сварки синтетических тканей также следует учитывать два момента. Во-первых, если волновод изготовлен из материала, для которого характерны большие гистерезисные потери, например, из стали, то при длительной работе происходит его разогрев, и теплоотвод из зоны сварки ухудшается. Так как продолжительность воздействия ультразвуком на материал остается постоянной, то ухудшение теплоотвода приводит к чрезмерному плавлению и передавливанию зоны сварного шва, вследствие чего прочность сварного соединения уменьшается. Во-вторых, при расчете геометрических размеров волновода из условия резонанса не учитываются потери энергии в материале волновода [4, 7]. В этом случае влияние материала волновода на прочность сварного соединения аналогично влиянию амплитуды колебаний.

Для исследования прочности сварного соединения из свариваемых тканей использовали экспоненциальные ножевые волноводы из стали 45 и алюминиевого сплава Д16Т. Оба волновода имели одинаковый коэффициент усиления, их длина соответствовала резонансу на одной и той же частоте, равной 22 кГц. Однако амплитуда колебаний волновода из сплава Д16Т с меньшими гистерезисными потерями составляла 30 мкм, в то время как амплитуда колебаний волновода из стали 45–20 мкм. Результаты испытания на раздир сварных соединений, свариваемых этими волноводами, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Материал	Прочность на раздир, МПа, при продолжительности сварки, с									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Сплав Д16Т	1,8	3,5	5,5	6,0	6,5	7,0	7,3	7,5	7,7	8,0
Сталь 45	1,0	2,4	3,5	4,5	5,5	6,0	6,2	6,5	6,8	7,0

Из таблицы 1 следует, что максимум прочности образцов при сварке стальным волноводом соответствует большему времени сварки, чем при волноводе из сплава Д16Т. Так, максимальная прочность при сварке волноводом из сплава Д16Т, равная 8,0 МПа, достигается за одну секунду, тогда как при сварке волноводом из стали 45 за одну секунду мы имеем прочность, равную 7,0 МПа. Очевидно, это связано с меньшей амплитудой колебания рабочего торца стального волновода. Некоторые снижения прочности объясняются также разогревом стального волновода. При исследовании установлено, что прочность сварных соединений, выполненных на стальной и алюминиевой опорах, почти одинакова. В то время как при сварке на опорах из дерева и стекла прочность приблизительно на 40% меньше для лавсановой и капроновой тканей и практически равна нулю для полипропиленовой ткани. При этом сварные швы сильно расплавились со стороны опоры, терялась эластичность и значительно увеличивалась жесткость сварного шва тканей. Очевидно, эти явления обусловлены низкой теплопроводностью дерева и стекла и, следовательно, слабым теплоотводом из зоны сварки.

В зависимости от назначения синтетических тканей применяют различные конструкции швов. Наиболее распространены стачные

(рис. 3а) и накладные (рис. 3б) сварные швы. Ниже приводятся данные о прочности этих швов применительно к рассматриваемым тканям см. табл.2.

Таблица 2.

Ткань (артикул)	Прочность шва, МПа	
	Накладной шов	Стачной шов
Лавсановая ткань (21710/3)	13,8	7,2
Капроновая ткань (22059)	14,0	7,5
Полипропиленовая ткань (24259/1)	12,3	6,5

Рис. 3. Сварные швы синтетических тканей (а - стачные, б - накладные) и схема испытания накладных сварных швов (в).

Как следует из этих данных, прочность накладных швов почти на 50% выше прочности стачных швов. Это обусловлено различной работой этих швов при приложении к ним растягивающей нагрузки. Стачные швы при приложении растягивающей нагрузки к верхнему и нижнему слоям ткани в направлении, перпендикулярном шву (по такой схеме проводили испытания), работают на расслаивание. Накладные же швы при этом работают в основном на сдвиг. Составляющая P_1 (рис. 3в), которая образуется вследствие того, что шов под действием реактивного момента занимает равновесное положение, составляет не более 17% внешней нагрузки P_1 , поэтому расслаиванием в данном случае можно пренебречь.

Иногда возникает необходимость многослойной сварки синтетических тканей. Исследовали свариваемость трикотажно-лавсановой ткани, применяемой для фильтрации стерильно чистых веществ. Установили, что время сварки с увеличением числа слоев возрастает, а прочность отдельных слоев определяется изменением характера тепловыделения и теплоотвода при увеличении числа слоев ткани. Так, при трехслойной сварке лавсановой ткани оптимальная прочность при расслаивании первого слоя, равная 7 МПа, так же как и при двухслойной сварке, достигается за время 0,4 с. При этом прочность второго слоя равна 5,2 МПа, а третьего — 3 МПа. Возрастание времени сварки до 0,6 с приводит к понижению прочности первого слоя и повышению прочности второго слоя, так что их прочность достигает одного значения — 6,2 МПа. При продолжительности сварки 0,7 с максимальную прочность, равную 6,2 МПа, имеет второй слой, тогда как первый и третий слои имеют одинаковую прочность, равную 4,2 МПа. Наконец, при времени сварки 0,8 с происходит почти полное передавливание первого слоя, так что его прочность падает до 3 МПа, прочность третьего слоя достигает максимального значения, равного 4,8 МПа, а прочность второго слоя уменьшается до 6 кН/м. Аналогичная картина наблюдается и при сварке четырех слоев этой ткани.

Значительное влияние на прочность сварных соединений тканей оказывает наличие в них нетермопластичных составляющих, например, хлопка, а также специальных покрытий. Авторами проводилось сравнение свариваемости чистой лавсановой ткани толщиной 400 мкм и ткани, состоящей из 33% хлопка и 67% лавсана такой же толщины. Испытания на сдвиг проводились на накладных сварных швах. Добавление хлопка привело к возрастанию времени сварки с 0,2 с (для чистой лавсановой ткани) до 0,6 с, причем максимальная прочность понизилась с 5,6 до 4 МПа. Было показано, что для повышения прочности сварных соединений тканей с добавками хлопка следует увеличивать их толщину. Так, при сварке лавсановой ткани состоящей из 33% хлопка и 67% лавсана, но имеющей толщину 600 мкм, достигалась максимальная прочность 5,8 МПа за сварочное время 0,8 с. Интересно, что падение прочности после достижения максимума с увеличением

времени сварки тканей с хлопком происходит менее резко, чем при сварке чистой лавсановой ткани. Это, вероятно, можно объяснить тем, что хлопковые нити препятствуют полному проплавлению и продавливанию термопластичной составляющей ткани. К тканям, имеющим на поверхности водоотталкивающие покрытия, относятся капроновые ткани типа «болонья», отличающиеся друг от друга различной толщиной и переплетением нитей в полотне. Сравнение свариваемости капроновой ткани толщиной 130 мкм с покрытием и капроновой ткани толщиной 150 мкм без покрытия показало, что время сварки увеличивается с 0,25 с для ткани без покрытия до 0,5 с для ткани с покрытием. Прочность при этом падает с 6 до 4,5 МПа. Это, очевидно, объясняется тем, что покрытие ткани препятствует удовлетворительному протеканию процесса перемешивания макрообъемов размягченного полимера и диффузии микрообъемов.

Из анализа приведенных данных следует, что режимы ультразвуковой сварки капроновых, лавсановых и полипропиленовых тканей довольно близки друг к другу при одинаковых толщине материалов и схеме сварки с применением пьезокерамического преобразователя.

К прочности изделий швейной промышленности обычно не предъявляют высоких требований. Отдельные участки и некоторые детали швейных изделий почти не испытывают нагрузок в швах в процессе эксплуатации (клапаны, воротники, передние швы рукавов, боковые швы изделий, петли). Именно в этих случаях применение ультразвуковой сварки наиболее эффективно [4, 6, 7]. Так, при использовании ультразвуковой сварки для обметки петель на белье и мужских рубашках время изготовления петли составляет 4,8 с, а при обычном способе обметки петель – 24 с.

При изготовлении круглых петель диаметром 13 мм одновременно пробивалось отверстие в ткани и металлической пленке с образованием ободка. Применение в этом случае ультразвуковой сварки позволило сократить время изготовления петли с 49 до 5 с, то есть производительность повысилась в 10 раз. При этом использовали ткани толщиной от 220 до 500 мкм из полипропиленового и капронового волокон в сочетании с шерстью, хлопком и искусственным шелком при содержании синтетического волокна не менее 50%.

Как показали исследования прессовой сварки трикотажа, хорошие результаты достигаются при сварке по фиксированной толщине сварного шва. Для плотных материалов, которые не изменяют своей толщины в диапазоне изменения статического сварочного давления 2–4 МПа. При этом толщина шва равна толщине одного слоя материала независимо от числа слоев (2–4) и вида шва (стачной, накладной).

При сварке пунктирными швами капронового трикотажного полотна капроновой ткани с пленочным покрытием рекомендуется оптимальную амплитуду колебаний принимать в пределах 25–30 мкм, т.е. больше, чем при сварке тканей технического назначения. Оптимальное значение статического сварочного давления для этих тканей составляет 2–3 МПа.

Соединение тканей на основе нетермопластичных волокон может осуществляться при помощи промежуточной термопластичной пленки. Хотя прочность сварных соединений, получаемых при этом, невысока, такой способ может применяться для временного соединения отдельных кусков ткани в ленту, что позволяет осуществлять непрерывный процесс отделки тканей. Соединение нитками в этих случаях часто приводит к браку из-за того, что утолщенные швы мешают тканям проходить через отделочное оборудование.

Исследовали свариваемость тканей из чистых натуральных целлюлозных волокон: бязи, сатина, сорочечной ткани. Сварку проводили через промежуточную полиэтиленовую пленку, толщина которой изменялась от 160 до 300 мкм.

При сварке перечисленных тканей через промежуточные пленки толщиной от 160 до 300 мкм оптимальная амплитуда колебаний, во всех случаях составляла 25–30 мкм, а статическое сварочное давление – 3 МПа. Независимость оптимальных значений параметров режима сварки от свариваемого материала объясняется тем, что соединение образуется в результате размягчения полиэтиленовой пленки и проникновения пластичного полимерного материала в поры ткани под действием статического давления. Очевидно, что размягчение пленки должно достигаться при одном и том же режиме сварки независимо от природы соединяемой ткани. Прочность сварных соединений, однако, будет различной, так как она обусловлена адгезией размягченного полиэтилена к волокнам ткани.

Выводы

1. При сварке с помощью ультразвука лавсановой, капроновой и полипропиленовой тканей толщиной 600 мкм оптимальная свариваемость обеспечивается при одинаковых толщине тканей, схеме сварки, типе сварочных преобразователей в следующем режиме: амплитуда колебаний рабочего торца волновода $A = 25\text{--}30$ мкм; сварочное статическое давление $P_{\text{ст}} = 3$ МПа; величина фиксированного зазора $S = 1,2$ мм; скорость сварки $V = 20$ м/ч.

2. При ультразвуковой сварке синтетических тканей применение пьезокерамических преобразователей увеличивает производительность процесса на 10%.

3. Высота и форма опоры практически не влияют на прочность сварных соединений. Установлено, что прочность соединений, выполненных на стальной и алюминиевой опорах, почти одинакова, в то время как при сварке на опорах из дерева и стекла прочность меньше на 40%. Прочность накладных швов почти на 50% выше прочности стачных швов.

4. Применение ультразвука для обработки петель позволило сократить время изготовления петли по сравнению со швейным производством с 49 до 5 с при амплитуде колебаний не более 40 мкм и времени сварки 5 с. Производительность при этом повысилась в 10 раз.

Литература

1. Соколов А.П. Сварка материалов в швейном производстве. М.: Легкая индустрия, 1988. 72 с.
2. Гуль В.Е., Акутин М.С. Основы переработки пластмасс. М.: Химия, 1985. 399с.
3. Каменев Е.И., Мясников Г.Д., Платонов М.П. Применение пластических масс: Справочник. Л.: Химия, 1985. 448 с.
4. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов: Учебное пособие для вузов. М.: Химия, 2001. 376 с.
5. Сварка полимерных материалов: Справочник/Зайцев К.И., Мацюк Л.Н., Богдасhevский А.В. и др./ Под общей редакцией Зайцева К.И и Мацюк Л.Н., М.: Машиностроение, 1988. 312 с.
6. Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Химия, 1986, 254 с.
7. Мозговой И.В. Основы технологии ультразвуковой сварки полимеров: Учебное пособие. Изд-во Красноярского Ун-та, 1991. 280 с.
8. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. Санкт-Петербург: Профессия, 2008. 560 с.