

В М 188576

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

НЕ ВЫДАЕТСЯ
НА ДОМ

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

Б. Я. ЧЕРНЯК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА
ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ
ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

(05.04.05 «Машины и технология сварочного производства»)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —

член-корреспондент АН СССР, проф., д. т. н., Николаев Г. А.

1. проф. Э. Г. Н. Ольшанский Н. А.

Официальные оппоненты: *2. Е. Н. С. К. Ф. М. Н. Алексин В. П.*

Ведущее предприятие: ВНИИЛТЕКМАШ.

Автореферат разослан «*27*» *января* 1973 г.

Защита диссертации состоится «*1*» *марта* 1973 г.

на заседании Совета

Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного
Знамени высшего технического училища им. Н. Э. Баумана
по адресу: М. 5.

Ваши от ... просьба вы-
сылать по у

С диссе ... теке Учи-
лища.

Ученый

М 188576

Ультразвуковая сварка является одним из наиболее перспективных способов соединения полимерных материалов, получившим большое развитие как в нашей стране, так и за рубежом. До настоящего времени исследователи уделяли внимание сварке сплошных изделий типа пленок, листов и т.п. или дискретных изделий, таких как синтетические ткани и сетки. Большой вклад в теоретическое и экспериментальное исследование свариваемости этих изделий внесли работы советских ученых школы МВТУ им. Баумана, руководимой член-корр. АН СССР Г.А.Николаевым, и ряда других организаций: А.В.Мордвинцевой, Н.А.Ольшанского, Н.В.Дружинина, И.В.Моогового, С.С.Волкова, В.И.Ложилова, Ю.Н.Орлова, Р.Н.Астаховой, А.Н.Мацук, А.В.Богдашевского, М.А.Карамышева, В.Т.Фаермана и многих других.

Однако, за последнее десятилетие исключительно большое значение приобрели изделия из синтетических волокон и среди них нетканые полотна, обладающие рядом ценных свойств, в частности, высокими фильтрационными характеристиками. Недостатком нетканых полотен, изготавливаемых наиболее распространенными способами, как отмечают В.Б.Тихомиров, Ю.П.Назаров и другие исследователи, является низкий коэффициент использования прочности волокон, составляющий 20-30%.

Целью настоящей работы являлось создание нетканых полотен, обладающих высокой механической прочностью и необходимыми для предфильтров фильтрационными характеристиками, посредством скрепления волокнистых холстов ультразвуковой сваркой. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать свойства исходного волокнистого сырья.
2. Изучить вопросы, связанные с теплообразованием в сплошных и волокнистых полимерных материалах под действием ультразвуковых колебаний.
3. Найти математическую модель процесса сварки волокнистых холстов, оптимальное сочетание параметров режима сварки и геометрических параметров, обеспечивающее наибольшую прочность материала.
4. Изучить влияние основных и дополнительных параметров режима сварки на прочность и структуру сварных соединений.
5. Исследовать фильтрационные характеристики разработанных материалов.
6. На базе технологических исследований создать оборудование для производства нетканых полотен предложенным способом.

Анализ существующих схем ультразвуковой сварки показал, что для скрепления волокнистых холстов наиболее приемлема схема контактной шовной прессовой ультразвуковой сварки с шаговым перемещением материала. Такая схема позволяет избежать деформаций и разрывов волокнистого холста как в процессе сварки, так и в процессе транспортировки его под рабочие органы.

Глава I. СВОЙСТВА ИСХОДНОГО ВОЛОКНИСТОГО СЫРЬЯ

В первой главе приводятся результаты исследований свойств исходного волокнистого сырья. Из всего многообразия карбо- и гетероцепных волокон для исследования были выбраны полипропиленовые (ПП) и полиэтилентерефталатные (ПЭТФ) волокна. Такой выбор обусловлен исключительными свойствами этих волокон, в частности, гидрофобностью и стойкостью в агрессивных средах, делающими их незаменимыми для изготовления волокнистых фильтров, работающих во влажной среде.

Наибольшее влияние на прочность нетканых полотен оказывают геометрические (тонина и длина) и механические (разрывная нагрузка и удлинение) характеристики исходного волокнистого сырья. Изменение этих характеристик проводилось при температуре 23°C и относительной влажности воздуха 65%.

Тонина волокон оценивалась по метрическому номеру, который определялся известными методами, по результатам двух параллельных измерений. Доверительные границы при этом устанавливались с помощью критерия Стьюдента.

Определение длины волокон производилось весовым методом на приборе Жукова. Во всех случаях кривая распределения длин волокон имеет правостороннюю асимметрию. Это свидетельствует о недостатках в технологии получения волокон, приводящих к обрыву их, от чего увеличивается число коротких и, соответственно, уменьшается число длинных волокон.

Статистические характеристики разрывной нагрузки и удлинения при разрыве одиночных волокон определялись после обработки результатов испытаний, проведенных на маятниковом динамометре. Во всех исследованных случаях распределение разрывной нагрузки подчиняется нормальному закону.

Существенное значение на прочность нетканого полотна оказывает ориентация волокон в холсте, т.к. от нее зависит число волокон, воспринимающих основную долю внешней нагрузки. В работе предложен способ определения ориентации волокон, согласно которому образцы для исследования изготавливаются по меньшей мере из двухкомпонентной смеси разнородных волокон и перед измерением один из

компонентов растворяется соответствующим реагентом. В экспериментах использовались холсты, состоящие из 50% ПП + 50% вискозы и 40% ПП + 60% шерсти. Вискоза в образцах первой группы растворялась азотной кислотой, а шерсть в образцах второй группы — раствором щелочи. В результате статистической обработки экспериментальных данных было получено, что средний арифметический угол ориентации составляет $2,5^{\circ} - 3,5^{\circ}$ со средним квадратическим отклонением $\pm 37^{\circ} + \pm 44^{\circ}$. Число волокон, расположенных в 15-ти градусных секторах, составляет 30-40%.

Глава II. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕПЛОБРАЗОВАНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Во второй главе дается теоретический и экспериментальный анализ процесса теплообразования при ультразвуковой сварке полимерных материалов.

Анализ литературных данных показал, что исследователи уделяют основное внимание границе раздела свариваемых деталей, считая, что здесь развиваются наибольшие температуры. Однако, имеются экспериментальные данные, которые невозможно объяснить с указанных позиций. Из них наибольший интерес представляют: 1) опыт И.В.Мозгового, в котором термопары, зачеканенные на границе раздела листов полиэтилена низкой плотности (ПЭНП), набранных в пакет, и термопары, установленные на таких же расстояниях в сплошном образце из того же материала, отметили практически одинаковые термические циклы; 2) опыт Ю.Н.Орлова, в котором показано, что при сварке пластин из ПЭНП толщиной 3+3 мм зона максимальных температур расположена не на границе раздела, а на расстоянии $1 + 1,5$ мм от рабочего торца волновода.

Указанные факты позволяют предположить, что разогрев полимеров при ультразвуковой сварке обусловлен гистерезисными потерями. Из исследований разогрева пластмасс при циклическом деформировании известно, что интенсивный разогрев их и переход кривой тепловыделения в высокотемпературную область происходит после достижения так называемой критической температуры $T_{кр}$. Это обусловлено известным характером изменения релаксационных характеристик (динамического модуля и механических потерь) от температуры.

Анализ термических циклов при ультразвуковой сварке полимерных материалов показал, что в этом случае интенсивный разогрев также начинается после достижения $T_{кр}$ (для ПЭНП она равна 60°C при температуре окружающей среды 23°C). Причем момент достижения $T_{кр}$ совпадает с моментом уменьшения кинетической характерис-

тики (амплитуды смещения датчика-опоры), которая является функцией релаксационных характеристик.

На основании вышеизложенного, в работе предлагается следующая гипотеза о теплообразовании при ультразвуковой сварке:

1. При ультразвуковой сварке разогрев полимерных материалов происходит за счет гистерезисных потерь.

2. Выделение теплоты в объеме полимера происходит неравномерно, вследствие ^{не}равномерности распределения напряжений и деформаций, а следовательно и работы деформирования, по высоте свариваемых деталей.

3. Неравномерное выделение теплоты, а также температурные условия на границах, соприкасающихся с волноводом и опорой, приводят к неравномерному распределению температур. Вследствие этого всегда существует сечение, в котором критическая температура $T_{кр}$ наступает раньше, чем в других сечениях. В дальнейшем, вследствие изменения релаксационных характеристик, это сечение получает преимущественный разогрев. Наиболее благоприятным будет случай, когда граница раздела совпадает с сечением, в котором $T_{кр}$ достигается ранее, чем в других сечениях.

4. При сварке "мягких" пластмасс, если граница раздела не получает преимущественного разогрева, соединение все же происходит благодаря тому, что разогрев и приложение статического давления приводят к возникновению процесса термоползучести, который сопровождается утонением полимера. Это вызывает постоянное перераспределение теплового потока в волновод и опору и сдвигу зоны максимальных температур к границе раздела. Следовательно, при больших толщинах деталей получение сварного соединения возможно только после определенной деформации полимера под волноводом.

5. При сварке "жестких" пластмасс, контакт деталей осуществляется по микронеровностям, которые не сминаются при приложении давления, благодаря большому модулю упругости. Так как реальная площадь контакта в этом случае невелика, на границе раздела возникают значительные динамические напряжения. Интенсивность достижения $T_{кр}$ пропорциональна амплитуде динамических напряжений, поэтому граница раздела получает преимущественный разогрев. Аналогичного эффекта можно добиться искусственным уменьшением реальной площади контакта, вводя на границу раздела различные концентраторы напряжений.

Рассмотрим задачу о разогреве полимерного материала при ультразвуковой сварке, для чего введем следующие допущения.

1. Зона, выделенная в свариваемых материалах статическим давлением, является вязкоупругим стержнем, по которому распространяются продольные колебания. Вязкоупругие свойства учитываются введением комплексного модуля $E^* = E_1 + iE_2$, где

E_1 — упругий модуль, E_2 — модуль потерь.

2. Податливость материала опоры много ниже податливости полимера, что дает право принять стержень закрепленным на конце.

3. Боковая поверхность стержня теплоизолирована.

4. Теплофизические и релаксационные характеристики не зависят от температуры. Это допущение справедливо до момента достижения $T_{кр}$, которым и ограничивается рассматриваемое решение.

Уравнение движения в одномерной вязкоупругой среде имеет вид:

$$E^* \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

где $u(x, t)$ — смещение; ρ — плотность среды; E^* — комплексный модуль.

Для рассматриваемого случая имеем следующие граничные условия:

$$u(0, t) = 0; \quad u(l, t) = u_0 \sin \omega t = \text{Im}(u_0 e^{i\omega t}) \quad (2)$$

где u_0 — амплитуда смещения в сечении $x = l$, ω — круговая частота.

Решение будем искать в виде:

$$u = [u_1(x) + i u_2(x)] e^{i\omega t} \quad (3)$$

Решение уравнения (1) в виде (3) при граничных условиях (2) было получено с помощью преобразования Лапласа:

$$\begin{aligned} u_1(x) &= C_1 \sin dx \operatorname{Ch} \beta x + C_2 \cos dx \operatorname{Sh} \beta x \\ u_2(x) &= -C_1 \cos dx \operatorname{Sh} \beta x + C_2 \sin dx \operatorname{Ch} \beta x \end{aligned} \quad (4)$$

где C_1 и C_2 — постоянные интегрирования, которые находятся из условия (2) на границе $x = l$:

$$C_1 = u_0 \sin dl \operatorname{Ch} \beta l (Sh^2 \beta l + \sin^2 dl)^{-1}; \quad C_2 = u_0 \cos dl \operatorname{Sh} \beta l (Sh^2 \beta l + \sin^2 dl)^{-1}$$

$$\alpha = \left[\frac{1}{2} \rho \omega^2 (\sqrt{E_1^2 + E_2^2} + E_1^2) (E_1^2 + E_2^2)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad \beta = \left[\frac{1}{2} \rho \omega^2 (\sqrt{E_1^2 + E_2^2} - E_1^2) (E_1^2 + E_2^2)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Очевидно, что волна смещения представляет собой наложение двух волн и амплитуда смещения будет равна:

$$\bar{u} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = u_0 \sqrt{\frac{\operatorname{Ch}^2 \beta x - \cos^2 dx}{\operatorname{Ch}^2 \beta l - \cos^2 dl}} \quad (6)$$

Используя решение (6) можно найти деформации и напряжения:

$$\varepsilon(x, t) = \text{Im} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{du_1}{dx} \sin \omega t + \frac{du_2}{dx} \cos \omega t \quad (7)$$

$$\sigma(x, t) = \text{Im} (E^* \frac{\partial u}{\partial x}) = (E_1 \frac{du_1}{dx} - E_2 \frac{du_2}{dx}) \sin \omega t + (E_1 \frac{du_2}{dx} + E_2 \frac{du_1}{dx}) \cos \omega t \quad (8)$$

Считая, что вся энергия деформации переходит в теплоту, получим следующее уравнение теплопроводности с внутренним источником теплоты:

$$C\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + b \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (9)$$

где C — удельная теплоемкость при постоянном давлении, K — коэффициент теплопроводности.

Вводя, как это сделано Шейпери, среднюю за цикл температуру $\bar{\theta} = \frac{2\pi}{\omega} \int_0^{\omega} \theta dt$ в уравнение (9), учитывая выражения (6), (7), (8) и переходя к безразмерным параметрам, получим:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \xi^2} + q (C_h \eta_1 \xi + C_{os} \eta_2 \xi) \quad (10)$$

$$\text{где: } \xi = \frac{x}{\ell}; \quad \tau = \frac{\bar{\theta} - \theta_0}{\theta_0}; \quad \tilde{\tau} = \frac{\kappa t}{C_p \rho \ell^2}; \quad \eta_1 = c_p \ell; \quad \eta_2 = c_d \ell; \quad (11)$$

$$q = \frac{\omega E_2 \epsilon_0}{4 \kappa \theta_0} (\alpha^2 + \rho^2) (C_p^2 + C_d^2)$$

Основываясь на экспериментальных фактах, можно предположить, что в сечении $x=0$ температура практически остается равной начальной, а в сечении $x=\ell$ происходит теплообмен поверхности холодного волновода с нагретым полимером. Следовательно, в обозначения (II) начальные и граничные условия будут

$$\text{где } h = \frac{A\ell}{K}; \quad T(\xi, 0) = 0; \quad T(0, \tau) = 0; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} + hT \right)_{\xi=1} = 0; \quad (12)$$

; A — коэффициент теплоотдачи.

Решая уравнение (10) при начальных и граничных условиях (12) методом Фурье, получим решение поставленной задачи:

$$T(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{\lambda_n^2} (1 - e^{-\lambda_n^2 \tau}) \sin \lambda_n \xi \quad (13)$$

где λ_n — собственные значения, C_n — коэффициенты разложения в ряд Фурье.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных проводилось для ПЭНП. В расчетах применялись усредненные в диапазоне 20–60°C характеристики. Экспериментальная кривая распределения амплитуд смещений хорошо согласуется с кривой, построенной по выражению (6), причем расхождение кривых не превышает погрешности измерения амплитуд оптическим методом ($\pm 2,5$ мкм). Распределение температур, просчитанное по формуле (13) на ЭВМ М-22, также удовлетворительно согласуется с эмпирическим, причем максимум температуры лежит не на границе раздела, а на расстоянии (0,3–0,4) ℓ от рабочего торца волновода.

Уравнение (II) можно использовать для качественного анализа особенностей теплообразования в волокнистом материале, если последний условно заменить эквивалентным ему сплошным стержнем. Интенсивность тепловыделения зависит от величины механических потерь в материале. Очевидно, что эта величина у волокнистых полимерных

материалов больше, чем у сплошных. Следовательно, время разогрева до температур сварки первых будет меньше, чем вторых. Кроме того, теплопроводность волокнистых материалов ниже, чем у сплошных из-за наличия воздушных прослоек. Вследствие этих причин можно предположить, что разогрев волокнистых материалов при ультразвуковой сварке будет приближаться к адиабатическому. В этом случае решение уравнения (10) будет иметь вид:

$$T = q \left(\sin \eta_2 \frac{z}{2} + \cos \eta_2 \frac{z}{2} \right) \quad (14)$$

При больших коэффициентах затухания наибольшие температуры, как это следует из выражения (14), будут развиваться непосредственно под волноводом. Для проверки этого вывода производилась термографирование процесса ультразвуковой сварки волокнистых холстов. В результате установлено, что характер термических циклов при сварке волокнистых холстов сходен с характером термических циклов при сварке сплошных материалов. Критическая температура перехода к интенсивному разогреву равна $\sim 100^\circ$ для ПП волокон и 130°C для ПЭТФ волокон. Во всех случаях наибольшая температура достигалась непосредственно под волноводом. Исходя из этого, кинетика образования сварного соединения при ультразвуковой сварке волокнистых материалов представляется следующим образом.

В начальный момент сварки непосредственно под волноводом, вследствие того, что здесь развиваются наибольшие температуры, образуется вязкотекучая прослойка. Под действием сварочного давления она вдавливается во внутренние слои волокнистого холста. При малой поверхностной плотности материала вязкая масса проникает до противоположной его стороны, оказывая подогревающее действие по всей толщине, что значительно сокращает время сварки. Когда толщина волокнистого материала сравнима с расстоянием, проходимым вязкой массой под действием заданного давления, время сварки должно изменяться незначительно. Дальнейшее увеличение поверхностной плотности материала приведет к резкому возрастанию времени сварки.

Сказанное подтверждается характером полученных экспериментальных зависимостей времени полного проплавления холста от поверхностной плотности. Все они имеют точку перегиба, соответствующую поверхностной плотности, равной 400 г/м^2 , после которой время проплавления резко возрастает. Поэтому технологические исследования проводились на волокнистых холстах, имевших указанную поверхностную плотность.

Глава III. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕТКАНЫХ ПОЛОТЕН ПОСРЕДСТВОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ВОЛОКНИСТЫХ ХОЛСТОВ

При растяжении полотна вдоль волокон, скрепленных поперечными швами, разрыв может произойти либо по сварному шву или околошов-ной зоне, либо по волокнам.

Прочность сварного шва определяется основными и дополнительными параметрами режима сварки. Суммарная прочность закрепленных между швами волокон определяется их статистическими характеристиками и шагом между швами.

Необходимо было найти оптимальное сочетание параметров режима сварки, обеспечивающее наибольшую прочность сварного шва, и зависимость прочности нетканого полотна от шага между швами.

Известно, что такого рода задачи оптимизации решаются как классическими методами, так и с помощью факторного планирования эксперимента. В работе применялось факторное планирование по методу Бокса и Уильсона.

В качестве оптимизируемого параметра было выбрано разрывное усилие полоски шириной 5 мм и длиной рабочей части 35 мм, вырезанной из сварного шва. Варьируемыми факторами были основные параметры режима сварки – амплитуда смещения (A), статическое давление (P) и время сварки (τ), уровни которых назначались на основе анализа экспериментальных данных по сварке сплошных полимерных материалов и предварительных экспериментов. Сварка образцов проводилась на установке УЗП-1 с использованием магнитострикционного преобразователя, мощностью 2,5 кВт и резонансной частотой 19,5 кГц.

Вначале был поставлен полный факторный эксперимент (ПФЭ) и проведено "крутое восхождение", с помощью которого были найдены режимы, близкие к оптимальным. Эти режимы были приняты за новые центры экспериментов, около которых были поставлены ротатабельные центральные композиционные планы. После реализации матриц планирования и расчетов, проведенных по известным зависимостям, были получены следующие результаты.

1. Сварка холстов, сформированных из ПЭТФ волокон.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{y} = 9,17 + 0,76x_1 - 0,75x_2 - 0,33x_3 - 1,77x_1^2 - 0,13x_2^2 - 0,67x_3^2 - 0,34x_1x_2 - 1,04x_1x_3 - 0,96x_2x_3 \quad (I5)$$

где $x_1 = \frac{A-30}{5}$; $x_2 = \frac{P-35}{5}$; $x_3 = \frac{\tau-0,3}{0,05}$; $\hat{y}$ – расчетное значение разрывного усилия сварного шва. Каноническая форма:

$$\hat{y} = 9,27 - 2,0x_1^2 + 0,16x_2^2 - 0,7x_3^2 \quad (I6)$$

Анализ уравнения (I6) показал, что наибольшему $\hat{y}$ соответствует следующий режим сварки: $x_1 = 0,07$, ($A = 30,3$ мкм), $x_2 =$

$= -1,68$ ($P = 26,6$ кг/см²), $x_3 = 0,89$ ($\tau = 0,34$ сек.), обеспечивающий расчетное значение разрывного усилия сварного шва, равное $Q_{\text{ш}} = 10,86$ кг. Для проверки найденного оптимального режима производилась сварка образцов на режиме $A = 30$ мкм, $P = 26,5$ кг/см², $\tau = 0,35$ сек. При этом среднее значение разрывного усилия сварного шва оказалось равным $11,4$ кг. Таким образом, ошибка предсказанного по уравнению регрессии значения разрывного усилия составила не более 5%.

2. Сварка холстов, сформированных из ПП волокон.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{Y} = 31,1 + 9,32x_1 + 2,36x_2 + 3,27x_3 - 4,67x_1^2 - 5,66x_2^2 - 3,6x_3^2 - 1,27x_1x_2 - 1,1x_1x_3 - 1,82x_2x_3 \quad (17)$$

где: $x_1 = \frac{A - 22}{5}$; $x_2 = \frac{P - 35}{5}$; $x_3 = \frac{\tau - 0,25}{0,05}$

Каноническая форма:

$$\hat{Y} = 36,1 - 6,4x_1^2 - 3,16x_2^2 - 4,38x_3^2 \quad (18)$$

Из уравнения (18) следует, что оптимальному режиму соответствуют координаты центра поверхности: $x_1 = 0,95$ ($A = 26,7$ мкм), $x_2 = 0,05$ ($P = 35,3$ кг/см²), $x_3 = 0,28$ ($\tau = 0,265$ сек), при котором расчетное значение разрывного усилия сварного шва будет $Q_{\text{ш}} = 36$ кг. Эксперименты, проведенные на режиме: $A = 27$ мкм, $P = 35$ кг/см² и $\tau = 0,26$ сек показали, что среднее значение разрывного усилия равно - $Q_{\text{ш}} = 35,2$ кг.

Во второй части главы приводятся результаты исследования зависимости разрывного усилия сварного шва от основных и дополнительных параметров режима сварки. Отклонение параметра от оптимального значения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения приводит к падению разрывного усилия. Это особенно заметно в случае сварки холстов из ПП волокон, при котором отклонение параметра на $\pm 10\%$ приводит к падению разрывного усилия шва также на 10% .

Понижение разрывного усилия нельзя объяснить только деформацией и утонением сварного шва. Действительно, изменение τ , в случае сварки холстов из ПП волокон, с $0,3$ до $0,4$ сек. или P с 35 до 50 кг/см² приводит к уменьшению разрывного усилия почти в шесть раз, в то время как толщина шва уменьшается только в два раза.

Такой характер рассматриваемых зависимостей, очевидно, связан со структурными изменениями, происходящими в волокнистом материале при облучении его ультразвуком. Для проверки этого предположения производились рентгеноструктурный анализ и электронная микро-

скопия сварных швов. Рентгенографическое изучение сварных швов производилось на приборах УРС-70 и ДРОМ-1 на медном излучении с никелевым фильтром. Степень ориентации кристаллитов определялась по кривой азимутального распределения интенсивности рефлекса 110. Для определения степени упорядоченности кристаллитов проводилось быстрое вращение образцов вокруг первичного рентгенового луча при медленном вращении счетчика.

Анализ показал, что при $\gamma = 0,3$ сек происходит значительная дезориентация кристаллитов. Угол дезориентации оси-C кристаллитов изменился с 27° в исходном состоянии до 42° . Дальнейшее ультразвуковое воздействие привело к полной переориентации кристаллитов, смещению максимума рефлекса 110 с экватора на меридиан и появлению в шве α -текстуры. На дифрактограммах при $\gamma = 0,4$ сек происходит резкое уширение рефлексов, вплоть до того, что они сливаются. Полуширина рефлекса 110 растет в два раза по сравнению с исходным волокном.

Известно, что переориентация кристаллитов и образование α -текстуры сопровождается релаксацией полимерных цепей и возникновением внутренних напряжений. Эти процессы приводят к росту дефектности кристаллитов, о чем свидетельствует уширение рефлексов на дифрактограммах, и к образованию микротрещин.

Наличие микротрещин и пустот по границам сплавления волокон подтверждено исследованием срезов образцов, облученных ультразвуком после предварительной фиксации поверхности волокон в 2% растворе четырехоксида осмия, с помощью электронного микроскопа 4 ЭМВ-100В.

Исследование влияния дополнительных параметров режима сварки на разрывное усилие шва показало, что наиболее приемлемой является сварка алюминиевыми или титановыми волноводами на опорной плите из стали 45 толщиной более 20 мм. Сварка стальными волноводами приводит к падению разрывного усилия на 10%, что объясняется ухудшением теплоотвода из сварного шва, т.к. эти волноводы разогреваются в процессе сварки до 60°C . По этой же причине происходит падение разрывного усилия на 10-15% при сварке на опорах, выполненных из материалов с малой теплопроводностью, таких как текстолит.

В третьей части главы рассмотрена задача о зависимости разрывного усилия нетканого полотна от шага между сварными швами. Показано, что эта зависимость определяется числом волокон, закрепленных между соседними швами, и характером распределения разрывной нагрузки исходных волокон. Число закрепленных волокон можно найти по

распределению длин волокон, выступающих из сварного шва. Последнее распределение хорошо аппроксимируется трапецией, причем равномерный участок трапеции совпадает с равномерным участком кривой распределения длин исходных волокон, которая может быть построена по сертификатным данным. Статистический подход позволил вывести следующую зависимость разрывного усилия сварного шва от шага между швами:

$$Q_{max} = (0,2 \div 0,25) N_m G (\bar{x} - S) f(t) \cdot 10^{-5} \text{ кг/см}$$

где N_m - метрический номер волокна, в м/г; G - поверхностная плотность полотна в г/м²; $\bar{x}$ и S - среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение разрывной нагрузки одиночного волокна, в г; $f(t)$ - относительное число закрепленных волокон, являющееся функцией шага.

Значительное влияние на разрывное усилие нетканых полотен оказывают добавки в холст нетермопластичных волокон. Так, добавки вискозы в холсты, сформированные из ПП волокон, приводят к линейному падению разрывного усилия, причем предельно допустимым следует считать содержание вискозы не более 65%.

В четвертой части главы приводятся результаты исследования фильтрационных характеристик разработанных материалов. Фильтрующие свойства оценивались по аэродинамическому сопротивлению, создаваемому материалом потоку газа ($\Delta P_{V\varphi}$) и коэффициенту проскока аэрозоля через испытуемый образец (K). Испытания проводились по известной методике с помощью нефелометра ФЭН-58.

$\Delta P_{V\varphi}$ во всех исследованных образцах прямо пропорционально скорости фильтрации V_{φ} . У образцов с различным содержанием ПП волокон $\Delta P_{V\varphi}$ растет с увеличением процентного содержания вискозы. Это хорошо согласуется с известной зависимостью Фукса-Стечкиной, если учесть, что при прочих равных условиях, диаметр волокон вискозы несколько меньше диаметра волокон ПП.

С увеличением V_{φ} от 1 см/сек до 70 см/сек K возрастает, в среднем, в два раза. При увеличении толщины образцов наблюдается незначительное уменьшение K . Начиная с V_{φ} 30 см/сек до 70 см/сек кривые $K = f(V_{\varphi})$ достигают области насыщения, что соответствует известным в практике фильтрации закономерностям.

Сравнение разработанного материала с существующими по коэффициенту фильтрующего действия показало, что при V_{φ} 1 см/сек - 5 см/сек и 20 см/сек он обладает лучшими фильтрующими свойствами, несколько уступая префильтрам из ультратонкого стекловолокна. Однако, не следует забывать, что при работе со стекловолокном

нередки осложнения санитарно-гигиенического характера.

Глава IV. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕТКАНЫХ ПОЛОТЕН, ПРЕДЛОЖЕННЫМ СПОСОБОМ

В четвертой главе приводится описание оборудования для изготовления нетканых полотен предложенным способом. Разработана установка УСНП-I, основное назначение которой - изготовление нетканых полотен посредством ультразвуковой сварки волокнистых холстов, сформированных из термопластичных волокон или из смеси последних с натуральными или химическими волокнами. Разработанная установка отличается от существующих возможностью производства сварки и транспортировки холстов без их деформации и разрывов, автоматическим сбросом давления независимо от работы акустического узла, что позволяет осуществлять различные циклы сварки, настройкой акустического узла относительно поверхности опоры и накопительным устройством.

Основанием для проектирования и изготовления установки УСНП-I послужили результаты испытаний разработанных материалов, проведенные в Физико-химическом институте им. Л.Я.Карпова, во Всесоюзном научно-исследовательском институте нетканых текстильных материалов и в Конструкторском бюро общего машиностроения. Испытания показали, что разработанные материалы превосходят существующие нетканые полотна как по механическим свойствам, так и по фильтрационным характеристикам и могут быть рекомендованы к внедрению.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Создан новый нетканый материал, изготавливаемый посредством ультразвуковой сварки волокнистых холстов. Материал превосходит существующие как по механической прочности, так и по фильтрационным характеристикам. Новизна и полезность разработанного материала подтверждены положительным решением на выдачу авторского свидетельства.

2. Показано, что наиболее приемлемой для сварки волокнистых холстов является схема прессовой контактной ультразвуковой сварки с шаговым перемещением материала. Такая схема позволяет избежать деформаций и разрывов нескрепленных холстов в процессе сварки и транспортировки материала.

3. Установлено, что механизмы разогрева полимерных материалов при ультразвуковой сварки и различных видах циклического нагружения идентичны, обусловлены гистерезисными потерями и харак-

теризуются наличием критической температуры, по достижении которой кривая тепловыделения скачком переходит в высокотемпературную область. Сформулирована гипотеза, согласно которой неравномерность разогрева при ультразвуковой сварке обусловлена неравномерным распределением деформаций и напряжений, либо значительной концентрацией напряжений в естественных или искусственных концентраторах. Гипотеза подтверждена теоретически и экспериментально.

4. Установлено, что при воздействии ультразвуковых колебаний на волокнистые холсты наибольшие температуры развивается в слоях, непосредственно прилегающих к рабочему торцу волновода. На основании этого предложена гипотеза о кинетике проплавления волокнистого холста при ультразвуковой сварке, подтвержденная экспериментально.

5. Показана эффективность применения метода Бокса и Уильсона для оптимизации процесса ультразвуковой сварки. С помощью этого метода найдены следующие оптимальные режимы сварки волокнистых холстов, сформированных из: ПП волокон $A = 27$ мкм, $P = 35 \text{ кГ/см}^2$, $\zeta = 0,26$ сек; ПЭТФ волокон - $A = 30$ мкм, $P = 26,5 \text{ кГ/см}^2$, $\zeta = 0,34$ сек. В первом случае достигается разрывное усилие 36 кГ, а во втором - 11 кГ на сварной шов шириной 5 мм.

6. Исследована зависимость разрывного усилия сварного шва от основных параметров режима сварки. Все зависимости имеют максимум, который наиболее сильно выражен при сварке холстов из ПП волокон. Показано, что такие зависимости обусловлены структурными изменениями, протекающими в материале под действием ультразвука. Падение прочности с увеличением параметров сварки выше оптимального значения объясняется возникновением α -текстуры, релаксацией полимерных цепей, приводящей к внутренним напряжениям и микротрещинам.

7. Установлено, что оптимальной является сварка волноводами, выполненными из титановых или алюминиевых сплавов, на стальной опорной плите толщиной более 20 мм.

8. Решена задача о зависимости разрывного усилия нетканого полотна от шага между швами. Предложенный инженерный метод расчета дает хорошее совпадение с экспериментом и может применяться не только при скреплении волокнистых холстов швами, посредством ультразвуковой сварки, но и при любом другом технологическом процессе скрепления швами, при условии, что прочность швов выше прочности волокон, закрепленных между ними.

9. На базе проведенных исследований разработана установка УСНП-I для производства нетканых полотен предложенным способом по автоматическому циклу. Установка позволяет осуществлять свар-

ку и транспортировку холстов без их деформаций и разрывов, автоматический оброс давления, настройку акустического узла относительно поверхности опоры и накопление готового материала. Новизна и полезность установки подтверждена положительными решениями на выдачу авторских свидетельств.

Диссертационная работа состоит из 4 глав и содержит 133 страницы машинописного текста, 40 иллюстраций и 10 таблиц.

Библиография представлена 94 работами.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Черняк Б.Я., Волков С.С., Орлов Ю.Н. Анализ процесса теплообразования при ультразвуковой сварке пластмасс. Сб. трудов МВТУ им. Баумана, Применение пластмасс в машиностроении, № II, 1971.
2. Черняк Б.Я., Раухвергер А.А., Орлов Ю.Н. Применение математического планирования эксперимента для определения оптимальных режимов ультразвуковой сварки волокнистых материалов. Сб. трудов МВТУ им. Баумана, Применение пластмасс в машиностроении, № II, 1971.
3. Черняк Б.Я., Раухвергер А.А., Волков С.С. Изготовление нетканых материалов посредством ультразвуковой сварки. Сб. трудов МВТУ им. Баумана. Применение пластмасс в машиностроении, № II, 1971.