

1547258

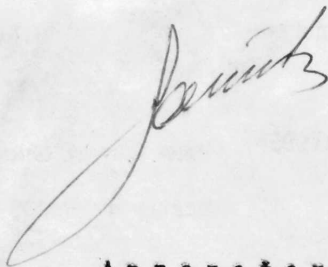
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ЗАЙЦЕВ Конкордий Иванович

**РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ КОНТАКТНОЙ ТЕПЛОВОЙ СВАРКИ ПЛАСТМАССОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Специальность: 05.03.06 – Технология и машины сварочного
производства**



А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Москва, 1995

Работа выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте по строительству трубопроводов (ВНИИСТ) Министерства топлива и энергетики Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Лившиц Л.С.

доктор технических наук, профессор Тростянская Е.Б.

доктор технических наук, профессор Холопов Ю.В.

Ведущее предприятие: НПО "Пластик"

Защита состоится "11" мая 1995 г. в 14³⁰ часов

на заседании диссертационного совета Д0.53.15.07 при Московском техническом университете им.Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская, 5.

Ваш отзыв в 1-ом экз., заверенный печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.Н.Э.Баумана.

Телефон для справок

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Подписано к печати. 1

Тираж 100 экз.

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1547258

Замцев К. И. Разработка тес

1547258

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Перспективы научно-технического прогресса нефтяной, газовой и нефтеперерабатывающих отраслей, составляющих основу энергетического потенциала страны, неизбежно связаны со значительным ростом объемов потребления пластмасс (преимущественно термопластов).

В настоящее время этими отраслями только пластмассовой пленки используется ежегодно более 150 тыс. т. Рост объема выпуска полимерных материалов и создание новых, в том числе: армированных полимерных пленок сложного совмещения, нетканых синтетических материалов, пластмассовых труб диаметром до 1220 мм, является основой для дальнейшего расширения производства и применения сварных пластмассовых конструкций в этих жизненно важных отраслях страны. Это является следствием не только растущего дефицита металла, но и других объективных причин. Интенсификация добычи путем подачи в нефтегазоносные пласты с поверхности земли различных иницирующих веществ приводит к образованию сероводорода, который при наличии воды ведет к разрушению стальных коммуникаций и конструкций вследствие проявления водородной хрупкости. Разрушения трубопроводов от внешней и внутренней коррозии относятся как 1:200. Ситуация еще больше усложняется с вовлечением в эксплуатацию крупных месторождений, содержащих помимо нефти и газа коррозионно-стойкие составляющие.

Для снижения интенсивности внутренней коррозии приходится завышать толщину стенок труб на величину, не диктуемую рабочим давлением, применять специальные стали, использовать химические добавки в виде ингибиторов, проводить многочасовую термическую обработку сварных швов. Все это сопряжено с большими дополнительными трудовыми, энергетическими и материальными затратами и вместе с тем не обеспечивает достаточных гарантий от коррозионных разрушений и аварий, ведущих к непредсказуемым последствиям и громадному ущербу.

Принципиальным решением, позволяющим исключить вредное воздействие перечисленных факторов, является применение пластмассовых конструкций: трубопроводов, резервуаров, цистерн, бассейнов и т.д. Это определяет актуальность всех работ, направленных на разработку технологических процессов и техники для создания и изготовления конструкций из пластмасс (термопластов), которые

не мыслимы без сварки.

Сварка как технологический процесс получения неразъемных соединений в максимальной степени позволяет реализовать основные достоинства пластмасс: коррозионную стойкость, герметичность, высокие антиадгезионные и другие полезные свойства. Однако до 60-х годов исследованиям в области сварки фактически уделялось недостаточно внимания.

В связи с этим автор с 1960 г. предпринял систематические исследования по выяснению механизма образования сварных соединений, а также исследования, направленные на разработку технологий и техники сварки термопластов, в частности, труб армированных пленок и нетканых синтетических материалов.

Представляемая работа является результатом многолетних исследований, проводимых во ВНИИсте по разработке технологий и техники сварки пластмасс, и выполнялась автором и под его руководством в соответствии с постановлениями Совета Министров СССР № 877 от 22.10.76 г., № 979 от 2.12.79 г. № 621 от 2.06.82 г., а также в соответствии с программой важнейшей научно-технической проблемы 0.72.025, утвержденной постановлением Госкомитета по науке и технике 25.12.70 г., программой по проблеме 0.72.01, утвержденной постановлением ГКНТ 5.11.76 г. № 390, и программой по проблеме 0.72.01, утвержденной ГКНТ и Госпланом СССР от 29.12.81 г. за № 515/271. Часть работ проводилась с 1967 г. по планам двустороннего научно-технического сотрудничества стран СЭВ по теме XVI.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы являлось:

1. Снижение материальных, энергетических и трудовых затрат путем замены в нефтяной и газовой промышленности стальных трубопроводов, железобетонных и металлических листовых конструкций сварными пластмассовыми.
2. Повышение срока службы и эксплуатационной надежности трубопроводных коммуникаций за счет уменьшения коррозионного воздействия.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие научные, технологические и технические задачи:

- установить роль состояния поверхности при образовании сварного соединения и определить кинетику этапов оплавления деталей при их контактном нагреве и осадке, вскрыть влияние на эти процессы технологических параметров сварки;
- изучить реологические процессы при образовании соедине-

ний и установить связь между основными технологическими параметрами режима сварки термопластов и на этой основе предложить общую классификацию термопластов по свариваемости;

- разработать математическую модель процесса контактной сварки и методику расчета тепловых процессов, протекающих при получении сварных соединений деталей из термопластов;

- разработать новые технологии и оборудование для высококачественной сварки пластмассовых конструкций в нефтяной, газовой и других отраслях энергетического комплекса;

- сформулировать принципы создания автоматизированного оборудования с обратной связью для стыковой контактной сварки термопластов.

Таким образом, данная работа представляется как решение крупной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение, заключающееся в создании теории, технологии и оборудования для контактной тепловой сварки термопластов, обеспечивающих повышение эксплуатационной надежности, снижение трудо- и энергоемкости при изготовлении конструкций из пластмасс.

Методы исследования. Для изучения специфического строения поверхностных слоев исходных и оплавленных термопластов и их сварных соединений использовались рентгеноструктурный анализ, ИК- и УФ-спектроскопия, оптическая, оптикополяризационная и электронная микроскопия, дериватографический анализ и другие современные методы.

Исследование и выбор основных параметров технологических вариантов сварки проводились с использованием теории вероятности и планирования экспериментов, а обработка полученных данных - с использованием методов математической статистики. Построение номограмм и обобщенных расчетных характеристик, а также решение большинства систем уравнений математических моделей выполнялось с помощью ЭМ. Использовались также методы температурно-временного моделирования.

В процессе работы созданы оригинальные методы исследования свойств сварных соединений. С целью определения несущей способности сварных соединений были изготовлены опытные стелды и построены полигоны для испытаний моделей сварных конструкций в натурных условиях; часть сварных конструкций испытывалась на полигонах Министерства обороны.

Научная новизна.

1. На основании изучения процессов, происходящих в зоне контакта соединяемых при сварке деталей из термопластов, разработана физико-технологическая модель процесса их сварки, выдвинута и развита новая концепция механизма образования сварных соединений, названная реологической, показывающая, что существенную роль в образовании сварных соединений термопластичных материалов играет течение расплава в зоне контакта свариваемых деталей.

2. Разработаны математическая модель процесса контактной сварки и расчетные методы определения тепловых полей в шве и околошовной зоне. Показано, что главными количественными критериями получения качественного сварного соединения являются температурный интервал вязкотекучего состояния выше $T_{\text{тек}}$, но ниже $T_{\text{дестр}}$, а также уровень и характер изменения в этом интервале вязкости расплава. Это позволило предложить классификацию термопластов по свариваемости.

3. Впервые установлена физическая связь между основными параметрами сварки и даны аналитические зависимости для их определения при сварке термопластов. Показано, что доминирующими факторами режима сварки являются температура инструмента, предельное время нагрева и давление осадки свариваемых деталей, при этом предельное время нагрева прямо пропорционально вязкости свариваемого материала, толщине детали и обратно пропорционально температуре нагрева; давление осадки пропорционально средней вязкости расплава, толщине свариваемых деталей и обратно пропорционально времени осадки.

4. На основе установленных закономерностей удалось теоретически обосновать и практически реализовать условия получения качественных сварных соединений, позволяющих максимально использовать физические и химические свойства пластмасс в температурном интервале вязкотекучего состояния, при снижении энергоемкости процесса сварки.

Практическая ценность и реализация результатов работ.

1. Доказана возможность использования сварных пластмассовых конструкций для сооружения объектов нефтяной и газовой промышленности.

Разработаны технологические процессы контактной тепловой сварки термопластов в виде труб, листов, профильных изделий и

пленочных материалов, которые включены в нормативные документы отраслевого и государственного уровня (СН 478-80; ВСН 440-83; ВСН 003-88; ОСТ 102-63-81; ОСТ 102-47-78; ОСТ 102-58-80 и др.).

2. Создано оригинальное сварочное оборудование: прессы, в том числе полуавтоматические с программным управлением для сварки пленок; трубосварочные устройства и машины (в том числе первые в СССР автоматизированные трубосварочные установки с программным управлением типа УСПТ-7), которые служат прототипами для моделей серийного производства. Их оригинальность подтверждена авторскими свидетельствами.

3. Созданы экспериментальные стенды и приборы (более 20 типов) и разработаны методы исследования, позволяющие получить количественные характеристики свойств сварных соединений термопластов при работе их в различных средах, при различных температурных режимах и нагрузках.

4. Осуществлено внедрение технологий сварки термопластов при создании оригинальных конструкций и сооружений в различных отраслях народного хозяйства. Отработана промышленная технология сварки антифильтрационных экранов рассолохранилищ для подземных резервуаров (в производственных организациях РАО "Газпром"), сварки систем трубопроводов нефтесбора, которые эксплуатируются с 1965 г. на нефтепромыслах Г.П. "Роснефть", сварки многооборотных контейнеров и укрытий, применяемых на производстве в легкой промышленности, сварки систем водо- и газоснабжения для сельского строительства и др.

Апробация работы. По мере выполнения исследований основные положения работы докладывались на всесоюзных научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах (Москва - 1961, 1977, 1988, 1992 гг.; Киев - 1974, 1976, 1979, 1981, 1988 гг.; Рига - 1983 г.; Львов - 1982 г., Ивано-Франковск - 1976 г., Рязань - 1968 г., Челябинск - 1986 г., Таллин - 1988 г. и др.), на республиканских и краевых конференциях (Новочеркасск - 1976 г., Владивосток - 1979 г., Ивано-Франковск - 1979 г., Одесса - 1979 г. и др.), московских конференциях сварщиков (1969, 1974, 1975, 1976, 1987 гг. и др.). О результатах докладывалось также на объединенной сессии научного и координационного Советов по проблеме "Сварка" в ИЭС им. Е.О. Патона. Систематически, начиная с 1965 г., результаты работы сообщались

на заседаниях комиссии "Сварка пластмасс" научного Совета по проблеме "Новые процессы сварки и сварные конструкции".

Публикации. По теме диссертации опубликовано свыше 150 печатных работ, в том числе 3 монографии, 7 брошюр, получено 17 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, изложенных на 517 страницах машинописного текста, с таблицами, содержит 209 рисунков, список литературы из 259 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дается анализ представлений различных авторов о механизме образования сварных соединений термопластов.

Развивая представления об аутогезии полимер-полимерных систем, в конце 50-х годов профессор Вюцкий С.С. выдвинул так называемую "диффузионную концепцию" механизма образования соединений термопластов. Отличительной чертой этой концепции является то, что она исходит из взаимодействия макромолекул и учитывает их цепное строение и гибкость. При этом сварное соединение рассматривается как следствие диффузии, т.е. процесса, происходящего на микроуровне. Диффузионная концепция образования аутогезионного соединения была первой, объясняющей ряд особенностей механизма сварки термопластов. Она в 60-х годах получила признание у многих отечественных и зарубежных исследователей и специалистов, занимающихся сваркой пластмасс (Закула В.Л., Дубровкин С.Д., Каган Д.Ф., Бухин В.Е., Мак-Келви Д.М., Гасин В.М., Дебел П., Сквайс Я. и др.).

Однако по мере накопления экспериментального материала были установлены явления, которые не могут быть объяснены с позиций диффузионной концепции сварки пластмасс.

Ананд И.Н. выдвинул теорию контактов, согласно которой образование сварного соединения термопластов происходит лишь по отдельным микроплощадкам. Однако, на наш взгляд, она не выдерживает критики в связи с тем, что не позволяет объяснить получение равнопрочных сварных соединений.

Были попытки объяснить механизм образования сварных соединений пластмасс на основе адгезии свариваемых деталей с

учетом микрорельефа их поверхности, физической и химической адсорбции, образования двойного электрического слоя и т.д.

Все эти явления в той или иной мере могут иметь место при сварке пластмасс. Однако, как показали наши исследования, не они определяют основное содержание процесса сварки, а представляют собой сопутствующие явления.

Рассматривая процесс образования соединения лишь на микроуровне, все вышеперечисленные концепции не учитывают геометрических параметров соединяемых деталей, состояния поверхностей в момент их контакта, роль макропроцессов, которые, как было установлено нами, являются определяющими в механизме образования сварного шва. Не уделялось в этих концепциях должного внимания тепловым процессам, также определяющим весь комплекс механизма образования сварного соединения.

Известным шагом в решении проблемы сварки термопластов являются работы группы исследователей из Аахенского технологического института ФРТ (Потенте Х., Зеэва К., Менгеса Г. и др.), которые в своей модели учитывают скорость осадки при контактной сварке. Авторами не дается объяснения причин получения качественных или некачественных сварных соединений при изменении скорости осадки. Однако рассмотрение скорости осадки как определяющего параметра не позволяет классифицировать пластмассы по свариваемости, так как скорость осадки не отражает природу полимера.

Таким образом, до настоящего времени нет установившейся, общепризнанной теории, позволяющей объяснить и предсказать процессы, происходящие при формировании сварного шва, позволяющей корректировать процесс сварки пластмасс в связи с изменением их молекулярной массы, молекулярно-массового распределения и их состава. Не решена задача управления формированием свойств сварного соединения путем направленного варьирования технологическими параметрами.

Достоверность результатов исследований механизма образования сварного соединения в значительной мере обуславливается принятым за модель способом сварки. Из большого разнообразия способов сварки пластмасс в нашей стране и за рубежом основной объем в настоящее время приходится на контактно-тепловой способ сварки, который обладает большей универсальностью и обеспечивает наиболее качественное формирование сварного шва.

Поэтому теоретические, экспериментальные и технологические исследования в нашей работе в основном базировались на этом методе сварки.

Во второй главе излагаются результаты исследований процессов, происходящих на поверхности деталей из термопластов при контакте с нагревателем. Рассматривается роль исходного состояния поверхности (шероховатость, химический состав) свариваемых деталей в образовании сварных соединений.

Установлено негативное влияние на образование сварного соединения изменений поверхностных слоев деталей, подлежащих сварке, под влиянием окружающей среды (температуры, солнечной радиации, запыленности) со временем.

Качественно и количественно показано, что при оплавлении нагретым инструментом деталей из термопластов происходит изменение их физических свойств и геометрических параметров. Обнаружено, что при нагреве плоских кромок плоским нагретым инструментом на нагреваемом торце образуется серповидный мениск, глубина вогнутости которого зависит от усилия прижатия нагревателя и времени контакта с ним, а также температуры нагревателя. Наличие такого мениска при стыковке деталей в процессе сварки приводит к защемлению воздушной прослойки, препятствующей сближению и взаимодействию макромолекул.

Показано, что при нагреве кромок может происходить терморазложение полимера с выделением газовой фазы, ведущей к образованию пор на оплавливаемой поверхности, что также затрудняет взаимодействие макромолекул при недостаточном течении расплава в стыке.

При контакте расплавленной поверхности с воздухом происходит активное окисление полимера, что подтверждено ИК-спектрометрическим анализом. Как установлено с помощью сканирующей калориметрии, при нагреве полимера в среде инертного газа (азота, аргона) окисления не наблюдается, а деструкция нагреваемого полимера начинается при более высоких температурах. Следовательно, при сварке в среде инертных газов можно получать не только более качественные сварные соединения, но можно уменьшить глубину проплавления и вести процесс нагрева более экономично по расходованию тепла.

Обнаружено также, что если проводить процесс оплавления за время, меньшее периода индукции окисления свариваемой плас-

массы, то сварной шов будет обладать высоким качеством и, наоборот, когда время сварки превышает период индукции - свариваемый шов не будет обладать требуемыми свойствами.

Установлено, что при данных параметрах режима нагрева (оплавления) спустя определенное время, названное нами предельным t_y , процесс сплавления переходит в квазистационарный, когда скорость проплавления становится близкой к скорости оплавления $v_{пр} \approx v_{опл}$, при этом дальнейший нагрев не позволяет увеличить глубину проплавления. На основании полученных предельных параметров нами составлена математическая модель процесса оплавления нагреваемых поверхностей деталей толщиной δ плоским инструментом, согласно которой расчетным путем можно определить предельное время нагрева t_y :

$$t_y = \frac{1.64\delta}{m} \left[\frac{\rho}{P_{опл}(\delta\Delta T)} \right]; \quad (1)$$

Скорость оплавления $v_{опл}$ при данной температуре нагревателя T_H будет:

$$v_{опл} = m^{\frac{3}{2}} \left[\frac{P_{опл} f(\delta\Delta T)}{2\rho\delta} \right]^{\frac{1}{4}} t_h^{\frac{3}{2}} \left\{ 2m \left[\frac{2P_{опл} f(\delta\Delta T)}{\rho\delta^2} \right] t_{on} \right\} \quad (2)$$

Максимальная глубина проплавления h_y при заданной скорости плавления в квазистационарном режиме может быть представлена зависимостью:

$$h_y = \frac{\alpha}{v_{опл}} \ln \left(\frac{T_H - T_0}{T_{пл} - T_0} \right); \quad (3)$$

Расчетом нами показано и экспериментально подтверждено, что теплоотдача в окружающую среду за счет конвекции на стадии оплавления кромок не оказывает заметного влияния на их температурное поле, так как над кромками создается определенный тепловой барьер вследствие радиационного и конвекционного потоков от выступающих частей нагревателя.

Таким образом, на основании исследований стадии оплавления (нагрева) пластмассовых деталей под сварку установлены граничные условия по температуре - она должна быть выше тем-

пературы текучести $T_{\text{тек}}$ (температуры плавления $T_{\text{пл}}$), но ниже температуры деструкции $T_{\text{дестр}}$. Установлены предельные значения по времени контакта с нагревателем. Это время $t_{\text{опл}}$ при заданной температуре нагревателя $T_{\text{н}}$ должно быть не больше t_y , выше которого процесс оплавления переходит в квазистационарный, а также не более индукционного периода.

Как частный вывод, следует: при больших скоростях нагрева возможно оплавление при температурах выше $T_{\text{дестр}}$, но при кратковременной выдержке в рамках периода индукции, т.е. возможна сварка термопластов на форсированном режиме при малой глубине проплавления.

При сварке ответственных деталей из интенсивно окисляющихся термопластов качественное соединение можно получить при сварке в инертной газовой среде.

Сделан также вывод, что давление нагревателя $P_{\text{опл}}$ при контакте с оплавливаемой поверхностью должно меняться по экспоненте, снижаясь по мере плавления нагреваемого термопласта, что позволяет обеспечить контакт с поверхностью и вместе с тем свести к минимуму объем вытекающего под давлением инструмента расплава из зоны контакта.

В третьей главе разработана физико-технологическая модель процесса тепловой контактной сварки термопластов. Излагаются основные результаты исследования процесса формирования сварных швов при сварке оплавлением и проплавлением.

С использованием оригинальной методики доказано, что образование сварного соединения термопластов возможно лишь при течении расплава в зоне контакта соединяемых деталей.

Установлено, что при сварке оплавлением для реализации Вандер-Ваальсового взаимодействия макромолекул по свариваемым поверхностям необходимо эвакуировать ингредиенты, препятствующие сближению активированных макромолекул, что осуществляется при течении полимера, находящегося в вязкотекучем состоянии.

Только после выноса в грат с расплавом экранирующих прослоек, при полном сближении соединяемых поверхностей, происходит процесс аутогезии, т.е. образуется сварное соединение, внешне наблюдаемое как коалисценция расплавленных кромок.

Этот макропроцесс является решающим первым этапом в получении качественного сварного соединения. Он требует наличия определенного количества расплава, определяемого глубиной проплавления и вязкостью полимера. Возникновением аутогезионной

связи заканчивается первый этап образования сварного соединения и лишь после этого вследствие тепловой флуктуации может происходить и происходит второй этап - диффузия макромолекул в зоне сварки.

Таким образом, процесс образования сварного соединения происходит как бы поэтапно на двух уровнях: вначале на макроуровне - объемное течение расплава и даже его частичное перемешивание и переход в аутогезию - первый этап, а затем вследствие значительной разницы в энергетическом потенциале слоев расплава в зоне соединения происходит второй этап - процесс взаимной диффузии, т.е. протекает процесс на микроуровне.

В этом суть вскрытого нами механизма образования сварного соединения и отличие от представлений, существовавших ранее.

Прямыми экспериментами по специально разработанной методике на слоистых образцах показано, что при соответствующих параметрах режима оплавления ($T_n, t_{оп}, P_{оп}$) и осадки ($P_{ос}, v_{ос}$) можно за счет течения расплава полностью эвакуировать в грат из зоны стыка ингредиенты, препятствующие взаимодействию макромолекул на поверхностях свариваемых деталей. На основании экспериментальных исследований реологических процессов в зоне стыка и изыскания возможностей управления ими предложена новая технология стыковой безгратовой сварки без осадки путем принудительного макроперемешивания расплава в стыке за счет смещения свариваемых деталей в процессе их контактирования после оплавления. При этом происходит принудительное разрушение прослоек, препятствующих взаимодействию макромолекул.

Проведенный нами анализ термомеханических кривых термопластов полиолефинового, полиамидного рядов и пластмасс на их основе позволил установить, что вязкость в интервале вязкотекучего состояния изменяется в зависимости от вида термопласта, его молекулярной массы и молекулярно-массового распределения и добавок, т.е. характеризует природу полимеров, а следовательно, и пластмасс на их основе. Так как интенсивность течения расплава в зоне контакта свариваемых деталей зависит от вязкости расплава, характер ее изменения в температурном интервале вязкотекучего состояния было предложено нами рассматривать в качестве индикатора свариваемости термопластов.

Количественными параметрами, характеризующими изменение вязкости (следовательно, и свариваемости) термопластов в интервале вязкотекучего состояния, нами предлагается следующее

(рис. I): ширина температурного интервала ΔT от температуры текучести $T_{\text{тек}}$ до температуры деструкции $T_{\text{дестр}}$; уровень вязкости в этом интервале и градиент, характеризующий степень снижения вязкости $\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$ в зависимости от повышения температуры.

Чем меньше вязкость термопласта в этом интервале и чем шире этот температурный интервал, тем лучше сваривается данный термопласт.

Исходя из предложенных параметров, согласно нашей реологической концепции, термопласты по свариваемости могут быть подразделены на четыре группы (см. таблицу).

Классификация термопластов по свариваемости

Уровень свариваемости	Интервал $T_{\text{тек}} - T_{\text{дестр}}$, °C	Вязкость расплава, Па.с	Градиент снижения вязкости, Па.с/10°C
Хорошо сваривающиеся	Более 50	Менее 10^3	Более 100
Удовлетворительно сваривающиеся	Не более 50	Не выше 10^5	Не менее 50
Ограниченно сваривающиеся	Не более 50	Выше 10^7	Требуется специальные меры до сварки
Трудно сваривающиеся	Энергия активации вязкого течения выше энергии химических связей		

Изучен характер изменения скорости перемещения свариваемых деталей в процессе осадки. По интенсивности изменения скорость осадки может быть подразделена на три периода: а) интенсивного роста; б) интенсивного падения; в) перехода в "релаксационный режим". Экспериментально показано, что существует оптимальная скорость осадки V_0 . Перемещение свариваемых деталей с малой скоростью (для ПЭ менее 10 мм/с) не позволяет удалять (эвакуировать) с расплавом из зоны стыка ингредиенты, препятствующие взаимодействию макромолекул, при перемещении с большей скоростью (для ПЭ более 100 мм/с) проявляется "эффект Виноградова", т.е. расплав, находясь в текучем состоянии, проявляет себя при осадке как высокоэластичное (резиноподобное) вещество, что

также не позволяет вытеснить из стыка ингредиенты. И в первом, и во втором случаях формирование сварного соединения может быть некачественным, что приводит к понижению его служебных свойств.

Из реологической концепции вытекает важный вывод, что для получения благоприятных условий, обеспечивающих взаимодействие макромолекул по соединяемым поверхностям деталей, необходимо вытеснение поверхностного слоя расплава из середины свариваемых стык элементов (рис. 2).

На основании исследований процесса осадки и течения расплава в зоне контакта нами было составлено несколько математических моделей механизма образования сварного соединения с учетом течения расплава, позволяющих с заданной точностью получать количественные технологические параметры осадки: давление P_0 , величину осадки Δ , время осадки t_0 . Математическая формулировка этой задачи выполнена нами с использованием уравнений движения.

Рассматривая расплав в зоне контакта свариваемых деталей как вязкую жидкость, уравнение движения для нее можно представить в цилиндрических координатах в скалярной форме системой равенств:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial z} + \eta \nabla v_z &= \frac{\partial v_z}{\partial t} ; \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \eta \nabla v_\theta &= \rho \frac{\partial v_\theta}{\partial t} ; \\ -\frac{\partial P}{\partial r} - \eta \nabla v_r &= \rho \frac{\partial v_r}{\partial t} ; \end{aligned} \quad (4)$$

где P - давление расплава; η - вязкость расплава; v_z, v_θ, v_r - векторы скорости течения; ρ - плотность расплава; r - текущий радиус; t - время течения.

Суммарная зона проплавления двух сопрягаемых труб равна h_0 (рис. 3), а после осадки - h

Эту систему уравнений удалось решить применительно к стыковой сварке труб, пластин и блоков, используя решение Стефана и учитывая, что в зоне свариваемого стыка всегда имеется область, где скорость расплава при осадке практически

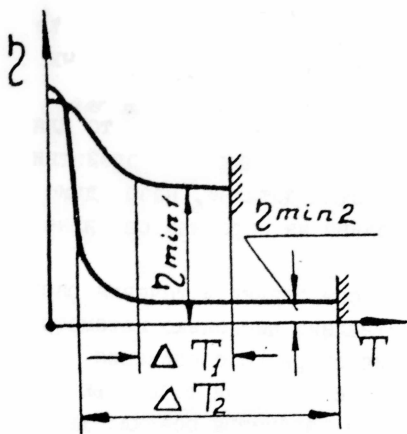


Рис.1

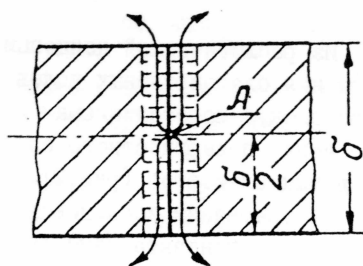


Рис.2

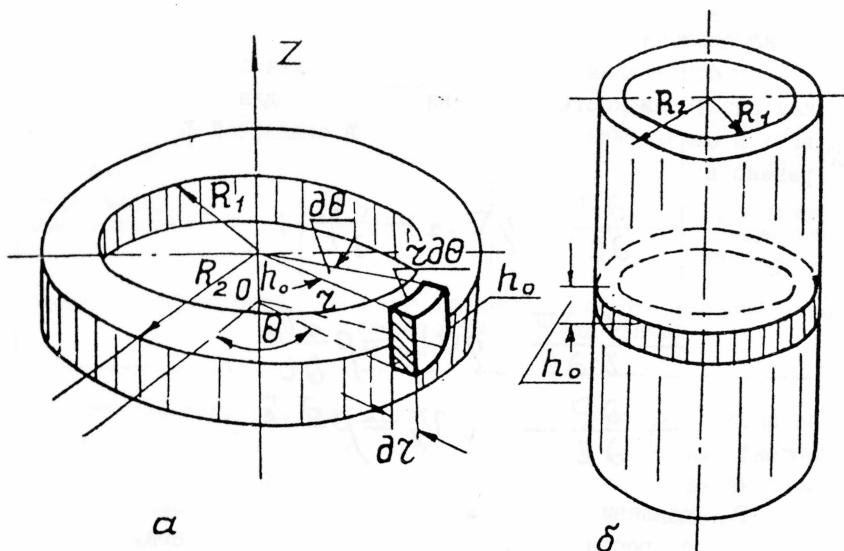


Рис.3 Расчетная схема течения расплава в процессе осадки при стыковой сварке: а - расчетный элемент; б - сваренные трубы

приближается к нулю.

Рассматривая при этих условиях элемент расплава (рис.3), нами была получена формула для расчета давления осадки $P_{ос}$ при сварке труб:

$$P_{ос} = \frac{32[(R_2^2 + R_1^2)(\ln R_2 - \ln R_1) - (R_2^2 - R_1^2)]}{4t(\ln R_2 - \ln R_1)} \left[\frac{1}{(h_0 - \Delta)^2} - \frac{1}{R^2} \right] \quad (5)$$

где Δ - величина осадки.

Зависимость (5) показывает, что давление осадки $P_{ос}$ должно быть тем больше, чем больше вязкость расплава, чем больше величина осадки, чем толще стенки свариваемых труб и чем меньше глубина проплавления. Естественно, что скорость осадки должна быть тем больше, чем меньше время осадки, т.е. Тем больше должна быть скорость течения расплава.

Установлено, что время осадки, сопровождаемое интенсивным течением расплава полимера, на порядок ниже, чем это предполагалось ранее другими исследователями, например, для полиолефинов составляет лишь доли секунды (0,2-0,6 с). При этом скорость осадки обратно пропорциональна вязкости расплава, нарастающей по мере осадки по экспоненте.

Исследовано изменение кратковременной прочности сварных стыков соединений в зависимости от температуры нагревателя, давления осадки. Обнаружено три зоны по температуре и две по давлению.

При низких температурах нагревателя (ниже 200°C) и высоких (выше 300°C) при сварке полиэтилена наблюдается снижение прочности сварных соединений. При высоких температурах происходит особенно резкое падение (провал) прочности. Однако с повышением давления осадки граница провала прочности сдвигается в область более высоких температур, а глубина провала уменьшается, что свидетельствует о том, что вследствие более интенсивной эвакуации расплава негативные процессы высокотемпературного нагрева (термодеструкция полимера и появление пор, окисление по границам захваченных газовых прослоек) в определенной степени компенсируются за счет вытеснения из зоны контакта нежелательных ингредиентов.

Прямыми экспериментами установлено, что при заданном давлении осадки из стыка эвакуируется расплав, обладающий наимень-

шей вязкостью; при достижении слоев, обладающих вязкостью суммарно уравновешивающей своим сопротивлением усилие осадки, течение прекращается, т.е. расплав из стыка не вытесняется полностью до границы зоны проплавления. Каков бы ни был температурный градиент по сечению зоны проплавления, осадка заканчивается при вытекании расплава до определенной температурной границы. Это позволяет также сделать вывод: что можно форсировать режим сварки по температуре, учитывая инерционность процесса нагрева термопластов.

Экспериментально доказано, что прочность сварного шва по сечению (дифференциально-послойная прочность) меняется по параболическому закону с максимумом в середине, что, очевидно, является следствием переориентации текстуры материала шва на 90° при течении расплава в контактной зоне.

Исследование микроструктуры поперечного сечения швов деталей из полиолефинов под оптическим микроскопом в поляризованном свете позволило установить четыре структурные зоны, из которых зона по границе проплавления представляет собой высокоориентированное состояние термопласта в виде тяжей. При измерении микротвердости нами установлено, что этой структуре соответствуют максимальные значения (пик твердости). Анализ полей собственных напряжений и изучение их изменения в процессе осадки и остывания позволили сделать вывод, что в районе границы проплавления материал находится под максимальными растягивающими напряжениями. При этом их максимальное значение соответствует району подгратовой зоны.

Как показано совместными исследованиями, проведенными нами с сотрудниками ГипроНИГаза Кашковской Е.А. и Кайгородовым Г.К., в подгратовой зоне вследствие интенсивной усадки грата могут возникать микротрещины в процессе остывания шва после сварки, которые, развиваясь со временем под действием рабочих нагрузок и поверхностно-активных сред, могут приводить к разрушению стыка. Это позволяет сделать вывод, что проблема технологической прочности существует не только для металлических, но и для пластмассовых сварных соединений.

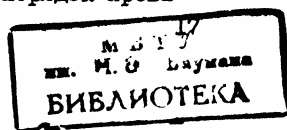
Для предупреждения образования подгратовых трещин и уменьшения эффекта усадки грата на снижение несущей способности шва нами предложен способ снижения растягивающих напряжений в подгратовой зоне термомеханической обработкой шва путем его

области в пластическом состоянии; на новую технологию получено авторское свидетельство № 479645. Отличие сварного шва по своим физическим и структурным свойствам от основного материала подтверждено также рентгеноструктурным и спектроскопическим анализами в ультрафиолетовом световом пучке, позволяющими утверждать, что в сварном шве кристаллических термопластов имеется не только кристаллическая, но и аморфная фаза, а также специфическая фаза, которую чл.-корр. Касаткин Б.С. и к.х.н. Гринюк Б.Д. считают аналогичной мартенситной структуре в металлах.

Исследование кинетики образования сварных соединений армированных пленок при контактной сварке на прессах шаговым методом позволило дифференцировать процесс на этапы. Первый этап - сближение и физический контакт по отдельным точкам и площадкам; второй (при нагреве и наличии давления) - дальнейшее удаление газовой фазы из зоны контакта; третий - при нагреве поверхностей контакта до текучего состояния происходит процесс растекания расплава от точек контактирования, сопровождаемый разрушением поверхностных слоев с перемешиванием расплава при таком течении; четвертый этап - равномерное течение расплава между армировкой (со смещением самой армировки) с постепенным затуханием процесса течения вплоть до момента смыкания слоев армировки свариваемых деталей пленок между собой.

Установлено, что наиболее интенсивное течение расплава в зоне контакта происходит в начальный период нагрева, по мере перехода полимера в текучее состояние. Следовательно, управление процессом сварки пленок следует производить в этот период. Для предупреждения деформации армировки и образования горф в околосшовной зоне было предложено одновременно прилагать к свариваемой пленке в этот период растягивающие усилия.

Сравнительные исследования сварки армированных и неармированных пленок подтвердили, что армировка оказывает значительное сопротивление течению расплава в зоне контакта свариваемых изделий, о чем свидетельствует меньшая деформационная способность армированной пленки. Скорость течения расплава при контактной сварке проплавлением на два порядка ниже, чем при сварке оплавлением. Это объясняется не только меньшим количеством расплава, но и затрудненностью его перетекания между армировкой и сварочными элементами. Вследствие этого тормозящего эффекта удельное давление при сварке пленок на порядок превышает



шает величину давления при стыковой сварке оплавлением. Для интенсификации реологических процессов в зоне контакта были разработаны технологии сварки с добавкой в зону контакта неармированной пленки, обладающей меньшей вязкостью, а также способ сварки пленки со сдвигом в процессе сварки.

Исходя из предложенной нами реологической концепции образования сварных соединений, были найдены формулы для расчета технологических параметров режима сварки пленок, которые взаимосвязаны и в свою очередь зависят от конструкции нахлестки.

С целью определения прочности сварных соединений армированных пленок были разработаны специальные образцы для испытаний на расслоение и на растяжение. С их помощью было показано, что кратковременная прочность сварных соединений, помимо технологических параметров, сварки (температуры нагрева, давления при сварке, времени выдержки при температуре сварки) определяется особенностями армировки (конструкцией, свойствами ее материала).

При течении расплава в процессе сварки в нахлестке происходит смыкание армировки и прочность соединения фактически зависит от адгезии покровного пленочного материала к армировке.

Экспериментально установлено, что это предельное состояние является и оптимальным, так как оно обеспечивает стабильность прочностных показателей не только при кратковременных, но и при длительных нагрузках без значительной дисперсии.

Таким образом, с позиций выдвинутой нами реологической концепции механизма образования сварных соединений основной целью сварки данного термопласта является создание такого термомеханического цикла, который бы интенсифицировал реологические процессы в зоне контакта в условиях максимальной релаксационной способности свариваемых полимеров или их композиций с целью снижения уровня остаточных напряжений.

В четвертой главе приводятся результаты разработки методов расчета тепловых полей и термических параметров технологических режимов контактной тепловой сварки, результаты исследования формы зоны проплавления при контактной тепловой сварке деталей оплавлением и изучения кинетики сварки пленок проплавлением. Они свидетельствуют о том, что тепловые потоки при нагреве, выдержке, формировании шва и его остывании носят объемный характер. Экспериментально нами было показано, что темпе -

ратура на нагреваемых поверхностях при их оплавлении измеряется по экспоненциальному закону.

Если принять для расчета тепловое состояние пластмассовых деталей при сварке схему одномерного распространения тепла, которая может быть выражена известным дифференциальным уравнением Фурье. Для упрощения его решения в инженерных расчетах оно было аппроксимировано нами с помощью нижеследующих обобщенных переменных:

$$\theta = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{F_{ox}}}\right); \theta = \frac{T_{\alpha,t} - T_n}{T_0 - T_n}; F_{ox} = \frac{\alpha t}{x^2}; \quad (7)$$

На ЭМ были рассчитаны значения безразмерной температуры θ в зависимости от безразмерного времени F_{ox} и представлены в виде номограмм (рис. 4, а), позволяющей определить глубину проплавления, температуру в любой точке нагреваемой детали в любое время, строить изохроны температур. Многочисленными экспериментами было установлено, что ошибка расчета находится в поле разброса фактических данных (зависящих от неоднородности пластмасс).

При сварке кристаллизующихся термопластов существенное значение имеет скорость нагрева и охлаждения стыка, так как она определяет характер конечных структур. Для расчетного определения скорости нагрева сплавляемых кромок безразмерный критерий в выражениях (7) дифференцируется по критерию Фурье

$$-\frac{d\theta}{dF_{ox}} = \phi(F_{ox}); \phi(F_{ox}) = \frac{1}{2F_{ox}\sqrt{\pi F_{ox}}} \exp\left(-\frac{1}{4F_{ox}}\right); \quad (8)$$

Значение функции $\phi(F_{ox})$ в зависимости от F_{ox} также было рассчитано нами на ЭМ и представлено в виде номограммы (рис. 4, б), позволяющей определять скорость нагрева в зависимости от времени нагрева, температуры нагревателя, а также определять другие функциональные зависимости.

Для расчета тепловой мощности сварочных нагревателей необходимо знать количество тепловой энергии, проходящей за время оплавления через границу оплавливаемой детали. Суммарную энергию, вводимую в нагреваемое изделие и затрачиваемую на плавление поверхностей, можно определить по формуле:

$$\theta(x,t) = \pi c \gamma \delta x (T_n - T_0) F(F_{ox}) - \pi \beta \gamma \delta (2\sqrt{\alpha t} - x); \quad (9)$$

где $F(F_{ox}) = 2\sqrt{F_{ox}} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{F_{ox}}}\right)$; $F_{ox} = \frac{\alpha^2 t}{x^2}$
 δ - толщина оплавленных кромок; β - скрытая теплота плавления термoplastа; δ - величина, назначаемая из условия:

$$\frac{(T_n - T_0)}{(T_0 - T_n)} \operatorname{erf} \delta$$

Для расчета по формуле (9) функция $F(F_{ox})$ представлена нами в виде номограммы (рис. 4, в).

Наибольший интерес представляет собой, когда режим оплавления переходит в квазистационарный, т.е. время нагрева может быть принято в расчете $t = \infty$. Тогда температура в любой точке может быть определена по формуле:

$$T(x) = T_0 + (T_n - T_0) \exp\left(-\frac{v_{on}}{\alpha} x\right); \quad (10)$$

Нами была получена зависимость безразмерной глубины проплавления N от безразмерного времени оплавления $\mathcal{Y}$ в виде трансцендентного уравнения:

$$B^N \operatorname{erf}\left(\mathcal{Y} + \frac{\ln B^N}{4\mathcal{Y}}\right) - \operatorname{erf}\left(\mathcal{Y} - \frac{\ln B^N}{4\mathcal{Y}}\right) = 2(B^N - B) \quad (11)$$

где $B = (T_n - T_0)/(T_n - T_0)$; $N = \frac{h}{h_{кв}}$; $\mathcal{Y} = \frac{v_{on}}{2\alpha} \sqrt{\alpha t}$;

значение максимальной глубины проплавления для данной скорости оплавления получается из выражения (10) при $T(x) = T_n$. Рассчитав при помощи ЭМ зависимости N от $\mathcal{Y}$ с использованием уравнения (11), получен график (рис. 4, г), который позволяет рассчитать зависимость глубины проплавления от времени нагрева и от скорости оплавления, а зависимость времени достижения квазистационарного режима - от скорости оплавления.

Построение изохрон температур при квазистационарном режиме согласно формуле (10) при различных скоростях оплавления показывает, что с увеличением скорости оплавления возрастает концентрация теплового потока вблизи нагревательного инструмента.

Нами разработана также методика расчета теплового состояния стыкового сварного соединения в процессе его охлаждения

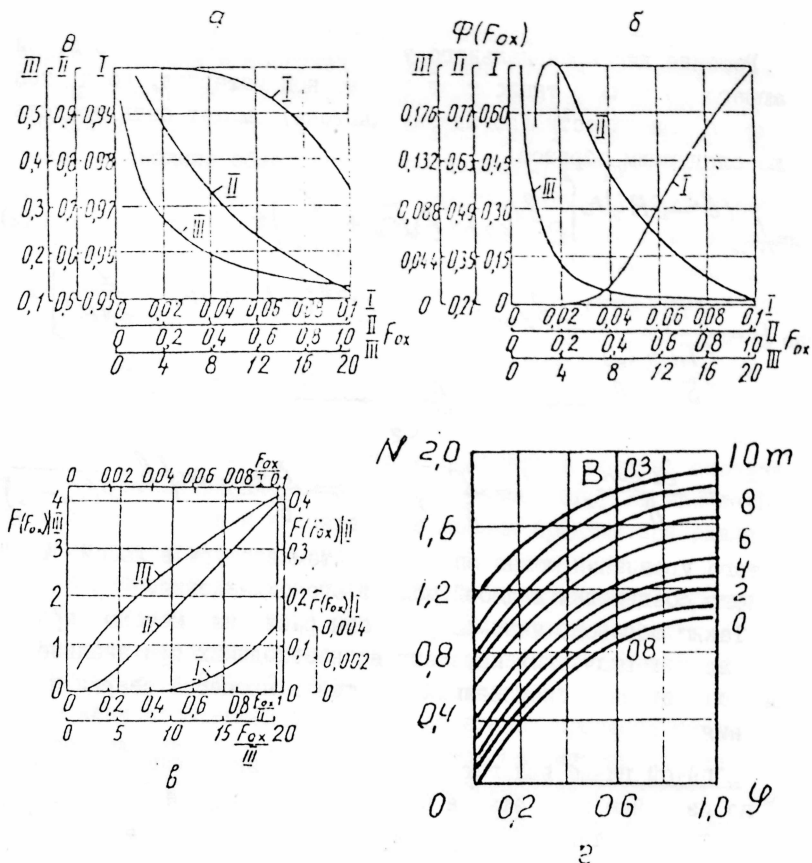


Рис.4. Номограммы для расчета тепловых процессов при контактном нагреве термопластов

после сварки.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности, учитывающего не только теплоотвод в основной материал, но и теплообмен с поверхности (по закону Ньютона), может быть представлено следующим образом:

$$\theta = \frac{1}{2} \theta \left(\beta^2 - 2Bi \right) F_0 \left[e^{\beta \sqrt{\mathcal{L}}} \operatorname{erfc} \left(\beta \sqrt{F_0} + \frac{\mathcal{L}}{2\sqrt{F_0}} \right) + \right. \quad (12)$$

$$\left. + e^{-\beta \sqrt{\mathcal{L}}} \operatorname{erfc} \left(\beta \sqrt{F_0} - \frac{\mathcal{L}}{2\sqrt{F_0}} \right) \right];$$

где $\theta = \frac{(T_{x,t} - T_0)}{(T_H - T_0)}$; $e^{\beta \sqrt{\mathcal{L}}}$; $+ e^{-\beta \sqrt{\mathcal{L}}} \operatorname{erfc} \left(\beta \sqrt{F_0} - \frac{\mathcal{L}}{2\sqrt{F_0}} \right)$;

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda}; \quad \beta = \frac{1}{2 \theta \sqrt{F_0}} \ln \left(\frac{T_H - T_0}{\frac{1}{2}(T_H - T_0)} \right); \quad F_0 = \frac{\alpha t}{\delta^2};$$

$$F_{0n} = \frac{\alpha t_{0n}}{\delta^2}; \quad \mathcal{L} = \frac{x}{\delta}; \quad \mathcal{L}_\alpha = \frac{\Delta \alpha}{\delta}; \quad \operatorname{erfc} \beta_i = \frac{T_H}{2(T_H - T_0)};$$

Из этого уравнения можно определить температуру в любой точке сварного соединения в любой момент его охлаждения.

Таким образом, нами разработаны расчетные методы определения всех термических параметров, необходимых при анализе теплового состояния свариваемых деталей в процессе сварки и охлаждения.

В пятой главе излагаются результаты интеграции исследований по изучению всех этапов процесса образования сварных соединений при контактной тепловой сварке термопластов (главным образом труб и армированных пленок). Приводятся обобщенные термомеханические циклы с количественными параметрами для сварки оплавлением и проплавлением, в которых отражено соотношение скоростей нарастания давления и скорости перемещения рабочих инструментов, обеспечивающих сближение макромолекул по контактной поверхности соединяемых деталей.

Установленные предельные значения и взаимозависимости параметров, в частности от величины вязкости в интервале вязко-текучего состояния, позволяют резко сузить пределы варьирования значений технологических параметров.

Для проверки найденных технологических параметров было создано несколько экспериментальных стендов для сварки, экспериментальный полигон для определения длительной прочности сварных соединений при их работе под различной нагрузкой в усло-

виях воздействия солнечных лучей, атмосферы и осадков. Были сконструированы и сооружены различные стенды для испытания сварных соединений труб и пленок под нагрузкой на образцах и в изделиях при выдержке в различных средах. Многопозиционные стенды позволяли обеспечивать постоянство нагрузок как при одностороннем воздействии сред (нефти, мазута, светлых нефтепродуктов), так и при двухстороннем, в том числе при выдержке в ПАВх в различных напередзаданных температурных режимах. Велись испытания и на стендах, обеспечивающих постоянство деформаций при нагружении сварных образцов в различных средах.

Для испытания сварных соединений армированных пленок на длительные динамические нагрузки, имитирующие условия работы привода быстроходных прецизионных токарных станков, были сконструированы стенды, позволяющие получать в сварных соединениях армированной пленки знакопеременные нагрузки как в воздушной среде, так и в контакте с любыми средами при различной степени растягивающих нагрузок.

Изучение характера оплавления и проплавления термопластов и, в частности, труб различных диаметров и толщин, дало возможность создать оригинальные нагреватели для их стыковой сварки (а.с. № 763121, 753663), позволяющих регулировать форму границы проплавления за счет сочетания процесса нагрева и зонного охлаждения оплавляемых кромок свариваемых деталей.

На основании исследований реологических процессов при сварке проплавлением нахлесточных соединений армированной пленки на прессах найдены условия получения швов с заплавленными (герметизированными) кромками, исключающими фильтрацию продукта по армировке. Была вскрыта причина разрушения сварного соединения армированных пленок в околосшовной зоне, которой является деформация (гофрирование) армировки при течении расплава в нахлестке при прогреве под давлением. На основании этих исследований созданы оригинальные, практические нетеплоинерционные нагреватели (а.с. № 852596), позволяющие обеспечить любой (по напередзаданной программе) тепловой режим при необходимом давлении на всем протяжении сварного шва с исключением гофрирования. Этот эффект достигается путем приложения растягивающих нагрузок к армировке в процессе заключительной стадии формирования сварного соединения.

Изучение технологической прочности сварных стыков труб из полиолефинов и воздействия на полиолефины нефти и нефтепро-

дуктов позволили найти способ (а.с.№ II7I356) предупреждения образования подгратовых трещин, резко снижающих сроки службы пластмассовых трубопроводов. Способ заключается в том, что после осадки охлаждение стыка ведется до температуры, равной температуре отпуска термопласта, после чего производится пластификация поверхностных слоев шва и околошовной зоны путем пропитки их при изотермической выдержке органическим растворителем на глубину, соизмеримую с глубиной проникновения подгратовых трещин. Установлено, что температура отпуска в данном случае определяется как $T_{отп} = (0,7-0,8) T_{пл} - (30-40)^{\circ}\text{C}$. Время выдержки стыка при $T_{отп}$ и воздействие пластифицирующих компонентов определяется требуемой глубиной проникновения пластификатора Δ и коэффициентом ее диффузии (D) в материал из соотношения: $\frac{\Delta}{\sqrt{Dt}}$;

С целью приближения по текстуре и структуре сварных швов к основному материалу эффективным является способ термомеханического упрочнения шва после осадки (а.с.№ 479645). При стыковой сварке оплавлением специальных трубопроводов, предназначенных для транспорта внутритрубных контейнеров и капсул, предложен способ удаления внутреннего граты (а.с.№ 573363).

Исследование механизма формирования сварных соединений встык позволили разработать под руководством автора во ВНИИСТе гамму трубосварочных установок для сварки труб диаметром от 63 до 350 мм с ручным приводом, с помощью которых было сварено несколько магистральных и промышленных трубопроводов, в том числе нефтепроводов и газопроводов на Бакинских и Башкирских нефтепромыслах. Впервые в СССР был сварен подводный переход для объекта московского завода "Серп и Молот" и морские выпуски в Балтийское море из полиэтиленовых труб диаметром 800 и 1020 мм.

Под руководством автора были сконструированы по заданию ГИИТ и выпущены серийно Киевским экспериментальным механическим заводом трубосварочные автоматы УСПТ-7 для сварки труб диаметром 140-355 мм, это были первые в СССР автоматы, работающие по настраиваемой программе и полностью без участия оператора, осуществляющие цикл сварки, начиная от двухстадийного оплавления и кончая необходимой выдержкой под давлением после осадки.

Совместно с НИИТранспрогресс было создано мобильное устройство для сварки пластмассовых труб диаметром 430-630 мм в

полевых условиях (а.с. № 727472), позволившее сварить в районе г. Раменское первый в СССР пневмотрубопровод диаметром 630 мм из полиэтиленовых труб для транспорта по нему контейнеров с жидкими и твердыми продуктами.

На основании выводов по исследованию механизма образования сварных соединений при сварке армированных пленок были выдвинуты требования к их свариваемости, главными из которых являются снижение до минимума объема технологических пластифицирующих добавок в полимерные композиции, экранизирующих поверхностные слои пленки, максимальное обеспечение адгезионных свойств этих композиций к армировке. Только в этом случае получается сварное соединение, отвечающее тем же требованиям, что и исходный материал сварной конструкции. На этом основании было создано несколько оригинальных композиций хорошо сваривающихся армированных пленок, в том числе (а.с. № 1031080) для ответственных сварных оболочковых конструкций массового выпуска.

Для сварки прямолинейных длинномерных швов пленочных конструкций шаговым способом были предложены и разработаны универсальные конструкции сварочных консольных прессов (а.с. № 200139), имеющих в 2,5 раза меньший вес по сравнению с традиционными прессами. Исследования термомеханического цикла сварки армированных пленок с покровным материалом на основе поливинилхлоридных композиций позволили создать совместно с Минским ЭКБ прессы-автоматы ПСТП-2, ПСТП-4 портально-консольного типа (а.с. № 1014735) с унифицированными узлами. Эти прессы, работающие с предподогревом, т.е. в непрерывном режиме нагрева (без охлаждения до 20°C), позволяют сократить длительность цикла сварки армированных пленок на 30%.

Для производства монтажных работ непосредственно на строительных объектах была разработана совместно с ЭКБ по железобетону при ВНИИСТ серия переносных прессов и технология производства при помощи их сборки и сварки оболочковых конструкций из армированных полимерных материалов. Для сварки неармированных полимерных пленок толщиной до 600 мкм в монтажных условиях были разработаны простые ручные устройства, позволяющие осуществлять сварку как шаговым способом, так и непрерывно.

Разработанные технологии сварки армированных пленок были внедрены при сооружении укрытий и тентов различного типа, мят-

ких цистерн и многооборотных контейнеров, понтонов и мягких опор для монтажа трубопроводов, подвески утяжелителей на трубопроводы, для изготовления приводных ремней и транспортеров, движителей болотоходов. Разработанные технологии сварки пластмассовых труб широко используются при сварке трубопроводов диаметром от 63 до 630 мм на нефтепромышленном строительстве. Созданное трубосварочное оборудование успешно работает в объединении "Азнефть" при сварке нефтепроводов из полиэтиленовых труб, при монтаже трубопроводов на стройках Прикаспийского нефтегазового комплекса, на объектах производственного объединения "Башнефть".

Результаты работы послужили основой при разработке многих нормативных документов по сварке пластмассовых конструкций в ряде отраслей страны.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана физико-технологическая модель контактно - тепловой сварки термопластов. Впервые выдвинута и систематическими исследованиями подтверждена новая концепция механизма образования сварных соединений термопластов, получившая наименование реологической, которая позволила разработать принципиально новые технологии сварки пластмассовых конструкций, а также позволившая сформулировать принципы создания сварочной автоматизированной техники новых поколений.

Установлено, что для образования сварного соединения при контактной тепловой сварке термопластов необходимо течение расплава в процессе образования шва. Новая концепция постулирует, что процесс образования сварного соединения термопластов осуществляется в два этапа.

Первый этап происходит на макроуровне с перемещением макрообъемов полимера, находящегося в текучем состоянии в расплаве, его можно количественно регулировать простыми технологическими приемами. Второй этап протекает на микроуровне с перемещением макромолекул.

2. Предложена классификация термопластов по свариваемости, базирующаяся на реологических свойствах свариваемых термопластов в интервале температур, соответствующих из вязкотекучему состоянию. Все термопласты по свариваемости разделены на четы-

ре группы: хорошо сваривающиеся, удовлетворительно сваривающиеся, ограниченно сваривающиеся, трудносваривающиеся. Предложены параметры свариваемости по этой классификации: ширина температурного интервала от температуры текучести до температуры разложения, минимальный показатель вязкости в этом интервале и градиент изменения вязкости при плавлении в зависимости от температуры.

3. Сделан вывод, что математический аппарат реологии жидкостей может быть продуктивно использован для расчетного определения параметров течения расплава при формировании сварного шва в процессе сварки термопластов оплавлением и проплавлением. Аналогичный вывод можно также отнести к возможности использования аналитического аппарата теории массо- и теплопереноса.

4. Получены аналитические зависимости для расчета термического цикла в зоне сварки и на их основе разработаны инженерные методики расчета термических параметров контактной сварки пластмассовых изделий.

5. Расчетным путем установлено и экспериментально подтверждено, что предельное время оплавления при контактном нагреве деталей из термопластов прямо пропорционально толщине свариваемых элементов, вязкости термопласта и обратно пропорционально усилию контакта с нагревателем и его температуре. Предельная глубина проплавления при заданной скорости проплавления пропорциональна температуре инструмента и обратно пропорциональна температуре плавления свариваемого материала.

6. На основе раскрытия механизма образования сварных соединений предложены научно обоснованные методы управления реологическими процессами при контактной тепловой сварке оплавлением и проплавлением на первой стадии за счет уменьшения потока течения расплава в зоне контакта свариваемых деталей (путем вращательных, возвратно-поступательных перемещений) в процессе формирования сварного шва (в процессе осадки), изменения формы контактируемых поверхностей в процессе их плавления (изменения формы подложек, формы нагревательных элементов). Регулирование течения за счет изменения тепловых полей в зонах шва и околошовной зоне (сочетание одновременного нагрева и охлаждения) потоком холодного газа или жидкости.

7. Созданы оригинальные модели сварочных устройств и установок для изготовления оболочковых конструкций (сварочные

пресса линейные и фигурные), а также трубосварочные устройства и автоматы для сварки пластмассовых трубопроводов, которые выпущены серийно, а также служат основой для конструирования промышленных машин и установок, в том числе автоматизированных систем для различных отраслей народного хозяйства.

8. На основании исследований были разработаны и реализованы технологии изготовления конкретных конструкций различного назначения (оболочконые укрытия, контейнеры, антифильтрационные экраны, цистерны, газопроводы, нефтепроводы, водопроводы и др.) со значительным экономическим эффектом.

9. Проведенные исследования позволили решить крупную народнохозяйственную проблему — изготовление объемных оболочковых конструкций; разработаны эффективные технологии контактной тепловой сварки проплавлением армированных полимерных пленок, в том числе относительно большой толщины и сложного совмещения, сущность которых заключается в использовании реологических возможностей покровных слоев такой пленки при одновременном регламентировании реологических процессов в шве и околошовной зоне за счет сочетания силовых и тепловых полей таким образом, чтобы интенсифицировалось течение расплава в шве и ограничивалось в околошовной зоне, что наиболее полно позволяет получить свойства сварного соединения, приближающиеся к свойствам основного материала. Обоснована также технология контактной тепловой сварки оплавлением труб из многотонажных термопластов с определением основных граничных условий как по температурному воздействию на полимерный материал, так и по времени его воздействия на первом этапе с учетом последующего силового воздействия для обеспечения физического контакта макромолекул по поверхности соединения за счет расплава с определенной скоростью, обеспечивающей удаление ингредиентов.

10. Результаты исследований по сварке термопластов включены в различные отраслевые стандарты и государственные НТД для проектирования и сварки пластмассовых конструкций.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Зайцев К.И. Сварка пластмасс при сооружении объектов нефтяной газовой промышленности. — М.: Недра. — 1984. — 224 с.

2. Зайцев К.И. Контактная сварка пластмасс в строительстве. — М.: Стройиздат, 1982, — 79 с.

- 3. Зайцев К.И., Мазок Л.Н. Сварка пластмасс - М.: Машиностроение, 1978. - 224 с.
4. Зайцев К.И. Сварка армированной пленки// Сварочное производство. - 1964. - № 8. - С.66-69.
5. Зайцев К.И. Соединение труб из полимерных материалов // Строительство трубопроводов. - 1965. - № 9. - С.4-6.
6. Зайцев К.И. Деформация при сварке синтетических пленок на тепловых прессах// Автоматическая сварка. - 1965. - № 10. - С. 31-34.
7. Зайцев К.И. Особенности термического цикла при контактной сварке труб из термопластов// Строительство трубопроводов. - 1966. - № 9. - С.13-14.
8. Зайцев К.И. Роль технологических деформаций в получении высококачественного сварного шва при соединении армированной пленки сложного состава// Сварочное производство. - 1967. - № 4. - С.29-30.
9. Зайцев К.И., Ляшенко В.Ф. Исследование тепловых процессов при стыковой сварке труб из термопластов// Автоматическая сварка. - 1968. - № 1. - С.37-39.
10. Зайцев К.И., Крайнов В.В. Деформирование полимерных пленок при сварке на прессах// Автоматическая сварка. - 1969. - № 5. - С.28-31.
11. Виндт Б.Ф., Зайцев К.И. Влияние технологических параметров на форму зоны проплавления при прессовой сварке термопластов// Автоматическая сварка. - 1969.-№10. - С.28-30.
12. Зайцев К.И., Сергеева Н.Л. О методе определения оптимальных параметров режима сварки армированной синтетической пленки// Сварочное производство. - 1969. - № 12. - С.16-17.
13. Зайцев К.И., Ляшенко В.Ф. Тепловые процессы при сварке труб из термопластов. - М.: ВНИИЭГазпром, 1970. - 38 с.
14. Зайцев К.И. О причине разрушения пластмассовых трубопроводов и схема расчета оптимальных параметров режима их сварки// Сварочное производство. - 1972. - № 6. - С.11-13.
15. Зайцев К.И., Бухин В.Е. Влияние реологических процессов в контактной зоне на качество сварных соединений труб из термопластов/ Строительство трубопроводов. - 1972. - № 7. - С.14-16.
16. Зайцев К.И. Механизм образования расплавленного слоя при контактной сварке термопластов и его влияние на режимы сварки/ Строительство трубопроводов. - 1973. - № 5. - С.14-16.

17. Зайцев К.И. Механизм образования соединений при контактной сварке термопластов оплавлением// Автоматическая сварка. - 1973. - С. 28-31.

18. Зайцев К.И. Критические напряжения в сварных стыках полиэтиленовых труб// Строительство трубопроводов. - 1974. - № 3. - С.17-18.

19. Зайцев К.И. Исследования механизма образования сварного соединения при контактной сварке// В сб.: Сварка полимерных материалов. Материалы семинара. - М.: МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1974. - С. 5-9.

20. Зайцев К.И., Истратов И.Ф., Ляшенко В.Ф. Сварка пластмассовых трубопроводов. - М.: Недра, 1974. - 70 с.

21. Зайцев К.И. Принципы создания систем с обратной связью для автоматов контактной сварки труб из термопластов// В сб.: Экспресс-информация, - М.: ЦНТИ ВНИИСТ. - 1974. - № 24. - С.9-13.

22. Зайцев К.И. Механизм течения полимерного материала при сварке его на тепловом прессе// Строительство трубопроводов. - 1974. - № 12. - С. 17-19.

23. Зайцев К.И. Дифференциальное исследование сварного стыкового соединения термопластов// Пластические массы. - 1975. - № 4. - С. 67-69.

24. Зайцев К.И. Методика аналитического определения температурного поля и давления осадки при контактной сварке термопластов// В сб.: Труды ВНИИСТ. - М.: ВНИИСТ. - 1974. - № 30. - С.332-350.

25. Зайцев К.И., Кашковская Е.А., Кайгородов К.Г. Особенности строения сварных швов при контактной сварке полиэтиленовых труб// Пластические массы. - 1975. - № 10. - С. 47-48.

26. Зайцев К.И. Контактная сварка армированных синтетических пленок. М.: ВНИИЭГазпром, 1971. - 52 с.

27. Зайцев К.И., Сергеева Н.Л. Исследование причин изменения химического состава и структуры сварных соединений армированных пленочных термопластов в процессе старения. - Сварочное производство// 1976. - № 6. - С. 10-12.

28. Зайцев К.И. Определение температуры на торцах труб из термопластов при контактной сварке// Сварочное производство. - 1976. - № 8. - С. 48-49.

29. Зайцев К.И. Особенности управления процессом стыковой сварки труб из термопластов// Автоматическая сварка. - 1976. - № 5. - С. 64-67.

30. Зайцев К.И. Контактная сварка встык труб из полиэтилена высокой плотности// Автоматическая сварка. - 1976. - № 12. - С. 32-33.

31. Зайцев К.И. Аналогии в механизмах сварки труб из термопластов и металлов// Строительство трубопроводов. - 1976. - № 2. - С. 33-34.

32. Зайцев К.И. Контактная сварка оплавлением пластмассовых труб на нефтепромыслах. - М.: ВНИИОЭНГ, 1976 - 77с.

33. SAJZEW K.I. UNTERSUCHUNGEN ÜBER BRUCHURSACHEN AN SCHWEIBVERBINDUNGEN VON POLYÄTHYLENRÖHRL EITUNGEN (PE) HALLE, IJS MITTEILUNGEN -1977 S 338-347.

34. Зайцев К.И. Контактная сварка пластмассовых труб и пленок и роль реологических процессов в образовании сварных соединений// В сб.: Повышение качества и эффективности сварочного производства на предприятиях Москвы. Материалы конференции - М.: МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского. - 1980. - С. 103-106.

35. Зайцев К.И., Корнеев В.Д. Математическая модель течения расплава в шве при контактной сварке пластмассовых труб встык // В сб. научных трудов ВНИИСТ. - М.: ВНИИСТ, 1980. - С.103-115.

36. Зайцев К.И. Оценка напряжений при контактной сварке термопластов// Строительство трубопроводов. - 1981. - № 12. - С.23-24.

37. Зайцев К.И., Ляшенко В.Ф., Виндт Б.Ф. Расчет охлаждения сварных стыков труб из термопластов// В сб.: Проектирование и строительство. - М.: Информнефтегазстрой. - 1981. - № 10. - С. 32-36.

38. Зайцев К.И., Виндт Б.Ф., Гомольский Е.М. Передвижная автоматизированная установка УСНТ-7 для сварки пластмассовых труб// Сварочное производство. - 1982. - № 1. - С. 12-13.

39. Зайцев К.И. Реологическая концепция механизма образования сварных соединений термопластов// В сб. научных статей.- КИЕВ: ИЭС им. Е.О.Патона, 1982. - С.3-7.

40. Лурье И.В., Виндт Б.Ф., Зайцев К.И. Методика расчета процесса осадки при контактно-тепловой сварке пластмассовых труб// Автоматическая сварка. - 1983. - С.31-33.

41. Зайцев К.И., Виндт Б.Ф., Лурье И.В. Воздействие нефти на несущую способность трубопроводов из полиэтилена// В сб.: Нефтепромысловое строительство. - М.: ВНИИОЭНГ. - 1984. - № 2. - С.6-8.

42. Зависимость степени окисления полиэтилена от технологических факторов аварии нагретым инструментом / Б.Ф.Виндт, К.И.Зайцев, И.В.Дурье, Б.Я.Покивайло, Р.Т.Сагателян// Автоматическая сварка. - 1984. - № 6. - С. 69-71.

43. Зайцев К.И. Эффективность применения пластмасс и сварных конструкций из них в нефтяной и газовой промышленности и методика расчета технологических параметров стыковой сварки // В сб.: Новые разработки по сварке полимерных материалов в трубопроводном строительстве. Сборник научных трудов. - М.: ВНИИСТ. - 1990. - С.3-13.

44. Зайцев К.И., Ляшенко В.Ф. Тепловые основы контактной сварки встык полиэтиленовых труб// Инженерно-физический журнал. - 1991, т. 60. - № 1. - С. 163-164.

45. А.С. № 200139, СССР. Консольный пресс/К.И.Зайцев, В.Д.Столяренко// Б.И. - 1967. - № 16.

46. А.С. № 238770, СССР. Установка для сварки термопластичной пленки/ К.И.Зайцев, Б.Ф.Виндт// Б.И. - 1969. - № 10.

47. А.С. № 246814, СССР. Стан для сварки термопластичных пленок /К.И.Зайцев, С.Я.Бортаковский// Б.И. - 1969. - № 21.

48. А.С. № 479645, СССР. Способ упрочнения сварных соединений /К.И.Зайцев// Б.И. - 1975. - № 29.

49. А.С. № 573363, СССР. Способ сварки труб из термопластов встык /К.И.Зайцев// Б.И. - 1977. - № 55.

50. А.С. - 753663, СССР. Нагреватели для стыковой контактной сварки труб из термопластов./К.И.Зайцев// Б.И. - 1980. - № 29.

51. А.С. № 794940, СССР. Устройство для сварки полимерных материалов /К.И.Зайцев, А.Г.Гладкий, Ю.Ф.Луцки и др. - 1980 - (д.с.п.)

52. А.С. № 763121, СССР. Нагреватель для стыковой контактной сварки труб из термопластов /К.И.Зайцев// Б.И. - 1980. - №34.

53. А.С. № 727472, СССР. Устройство для сварки труб из полимерных материалов /К.И.Зайцев, В.А.Коновалов, Б.Ф.Виндт и др. // Б.И. - 1980. - № 4.

54. А.С. № 852598, СССР. Способ сварки внахлест термопластичных пленок и устройство для его осуществления /К.И.Зайцев // Б.И. - 1981. - № 29.

55. А.С. № 1014735, СССР. Устройство для контактной тепловой сварки термопластичных материалов /К.И.Зайцев, А.Г.Гладкий, Н.Л.Сергеева, А.М.Шашенев// Б.И. - 1983. - № 16.