



Thermal History Management of TCP Manufacturing Process:

ключевой фактор проектирования
промышленного производства термопластичных
композитных труб ГПАТ/ТСР

FARTROUVEN
Research and Development

Thermal History Management of TCP Manufacturing Process:

**ключевой фактор проектирования промышленного
производства термопластичных композитных труб**

Михаил Попов, Нельсон Бернардо

Аннотация

Технология полностью связанных термопластичных композитных труб (Thermoplastic Composite Pipe, TCP) становится одним из наиболее перспективных направлений развития трубопроводных систем для нефтегазовой отрасли, водородной энергетики, химической промышленности и других областей, предъявляющих высокие требования к надежности, долговечности и коррозионной стойкости.

В статье проведен сравнительный анализ одно-, двух- и трехэтапных процессов промышленного производства ТСР, рассмотрены их преимущества, ограничения и влияние на формирование композитной структуры трубы. Показано, что развитие технологии ТСР связано не столько с усложнением производственных линий, сколько с необходимостью независимого управления физическими процессами, протекающими в материале на различных стадиях производства.

На основе проведенного анализа предложена концепция Thermal History Management of TCP Manufacturing Process, рассматривающая производственный комплекс как систему управления последовательностью термических и термомеханических процессов формирования композитной структуры трубы. Сформулированы принципы проектирования производственных комплексов ТСР нового поколения, основанные на переходе от проектирования технологических операций к проектированию управляемых процессов формирования материала.

Статья предназначена для специалистов в области производства композитных труб, разработчиков технологического оборудования, инженеров, занимающихся проектированием производственных комплексов ТСР, а также компаний, рассматривающих создание собственного производства термопластичных композитных труб.

Предложенный подход может служить методологической основой для дальнейшего совершенствования технологий промышленного производства полностью связанных термопластичных композитных труб.

Ключевые слова:

ТСР; RTP; Thermoplastic Composite Pipe; полностью связанные композитные трубы; полимерно-армированные трубы связанной конструкции; производство ТСР; консолидация; тепловая история; Thermal History Management.

1. Почему ТСП — это не просто армированная пластиковая труба

Развитие технологии **Thermoplastic Composite Pipes (TCP)** открывает новые возможности для нефтегазовой отрасли, водородной энергетики, химической промышленности и инфраструктурных проектов.

Высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, снижение массы конструкции и возможность создания гибких трубопроводных систем делают ТСП привлекательной альтернативой традиционным металлическим трубам и существующим решениям на основе полимерных материалов.

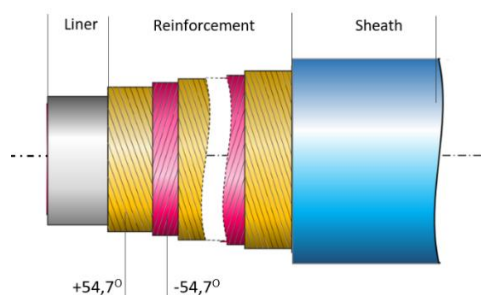
Однако при проектировании производственных комплексов ТСП часто возникает фундаментальная ошибка: технология рассматривается как простая операция намотки композитной ленты на пластиковую трубу.

Такой подход особенно характерен для компаний, имеющих опыт производства стандартных полимерных труб из термопластов — HDPE, PP-R и других материалов.

Производство коммунальных полимерных труб действительно в основном определяется:

- стабильностью процесса экструзии;
- точностью геометрических параметров;
- управлением охлаждением;
- контролем качества исходного материала.

ТСП представляет собой принципиально другую инженерную систему.



ТСП является многослойной композитной **полностью связанной (fully bonded) конструкцией**, в которой:

- полимерный лайнер обеспечивает герметичность и совместимость с транспортируемой средой;
- армирующая система воспринимает основные механические нагрузки от внутреннего давления и внешних воздействий;
- наружный слой обеспечивает защиту композитной структуры от внешней среды и механических повреждений;
- все слои термически соединены между собой для формирования единой несущей конструкции;
- качество межслойных интерфейсов определяет долговременную надежность трубы.

Следовательно, промышленное производство ТСП — это не изготовление пластиковой трубы с дополнительным армированием.

Это сложный процесс формирования **термопластичной композитной структуры**, в котором каждый слой проходит собственный термомеханический цикл, а конечные свойства трубы определяются всей совокупностью тепловых воздействий, процессов кристаллизации, усадки, релаксации и консолидации.

Именно поэтому управление тепловой историей (**Thermal History Management**) является одним из ключевых факторов, определяющих:

- качество ТСП;
- долговременную надежность;
- соответствие требованиям нефтегазовых компаний;
- экономическую эффективность производства.

2. Одностадийный, двухстадийный и трехстадийный процессы производства ТСП

Выбор архитектуры технологического процесса является одним из первых и наиболее важных решений при проектировании промышленного ТСП-завода.

Традиционно рассматриваются три основных подхода:

1. одностадийный процесс;
2. двухстадийный процесс;
3. трехстадийный процесс.

Каждый из этих подходов имеет собственные преимущества и ограничения, связанные не только с производительностью и стоимостью оборудования, но и с возможностью управления формированием композитной структуры.

2.1. Одностадийный процесс

Принцип

В одностадийной схеме основные операции объединены в единую непрерывную технологическую линию: *Экструзия лайнера → намотка и консолидация армирующей системы → нанесение наружной оболочки → Охлаждение*



Основная идея такого подхода заключается в использовании непрерывности процесса для:

- сокращения количества технологических операций;
- уменьшения площади производства;
- потенциального снижения капитальных затрат;
- увеличения непрерывности выпуска продукции.

Потенциальные преимущества

1. Минимальное количество технологических операций

Отсутствуют:

- промежуточная намотка лайнера;
- хранение полуфабриката;
- повторная размотка;
- дополнительный нагрев перед армированием.

2. Минимальные капитальные затраты

Теоретически такая схема позволяет уменьшить:

- количество технологического оборудования;
- площадь производственного комплекса;
- количество вспомогательных систем.

3. Отсутствие отдельного повторного нагрева лайнера

Однако это преимущество является относительным. Отсутствие повторного нагрева не означает отсутствие тепловых рисков.

Основная проблема заключается в том, что армирование происходит в момент, когда лайнер еще не находится в полностью стабильном состоянии.

Основные недостатки

1. Армирование нестабилизированного лайнера

После выхода из экструдера термопластичный лайнер продолжает проходить процессы:

- кристаллизации;
- объемной усадки;
- релаксации внутренних напряжений.

При нанесении армирующей системы на горячий лайнер его:

- геометрия;
- температурное состояние;
- механические свойства

еще изменяются.

Это может привести к:

- изменению фактического диаметра лайнера после завершения усадки;
- изменению натяжения UD-ленты;
- отклонению фактического угла намотки от расчетного;
- возникновению дополнительных остаточных напряжений в межслойных границах.

Для ТСП, работающих в условиях высоких давлений, циклических нагрузок и длительной эксплуатации, такие изменения могут существенно влиять на долговременную надежность конструкции.

2. Ограниченная гибкость производства

Одним из основных требований промышленного производства ТСП является возможность создания широкого диапазона изделий:

- различного диаметра;
- различных классов давления;
- различных транспортируемых сред;
- различных материалов армирования и матриц.

Например:

Типы армирующих материалов:

- стекловолокно;
- углеродное волокно;
- арамидные волокна;

в различных полимерных матрицах:

- HDPE;
- PE-RT;
- PA;
- PVDF;
- PEEK.

Группы транспортируемых сред:

- промышленная вода и химические реагенты (техническая вода, растворы ингибиторов и химикатов);
- нефть и многофазные среды (сырая нефть, нефтегазовые смеси, попутная вода);
- углеводородные газы (природный газ, попутный нефтяной газ).

Для повышения рабочего давления ТСП часто требуется увеличение количества армирующих слоев.

Это означает необходимость выполнения нескольких циклов армирования.

В одностадийной линии повторное армирование готового лайнера существенно затруднено, поскольку:

- экструзионная часть;
- зона армирования
- зона нанесения оболочки
- система охлаждения;

расположены на одной технологической оси.

Для повторного цикла армирования необходимо:

- вывести экструзионный участок из рабочей оси;
- обеспечить подачу уже изготовленного лайнера;
- затем восстановить исходную конфигурацию линии.

Это снижает гибкость производства и усложняет выпуск труб с различными характеристиками.

3. Ограниченная возможность управления тепловой историей

В одностадийной архитектуре процессы:

- экструзии лайнера;
- охлаждения;
- армирования;
- консолидации;
- нанесения оболочки

тесно связаны между собой. Оптимизация одного участка может ухудшать условия другого.

Например:

- увеличение температуры лайнера улучшает соединение первого армирующего слоя, но повышает риск изменения размеров лайнера;
- увеличение теплового воздействия для улучшения консолидации может изменить структуру уже сформированных слоев;

- режим нанесения оболочки должен учитывать состояние всей композитной стенки.

Таким образом, тепловая история ТСП формируется как результат компромиссов между различными технологическими операциями.

Это ограничивает возможность оптимизации морфологии композитной структуры и управления остаточными напряжениями.

Вывод по одностадийному процессу

Одностадийная схема может быть привлекательной с точки зрения компактности и потенциального снижения капитальных затрат.

Однако для промышленного производства ТСП высокого класса, предназначенных для нефтегазовой отрасли, водородной энергетики и других ответственных применений, основным ограничением является не сама непрерывность процесса, а **ограниченная возможность независимого управления тепловой историей отдельных элементов конструкции.**

В результате возрастает риск формирования скрытых дефектов:

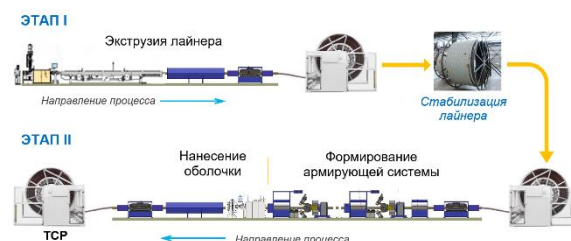
- недостаточной консолидации;
- изменения межслойных свойств;
- остаточных напряжений;
- локальных зон пониженной долговременной прочности.

Именно поэтому при проектировании современных ТСП-заводов ключевым критерием выбора технологической архитектуры должна быть не только скорость производства, но и способность системы обеспечивать контролируемое формирование полностью связанной композитной структуры.

2.2 Двухстадийный процесс

Принцип

В двухстадийной архитектуре производство лайнера и формирование композитной структуры разделены на два самостоятельных технологических процесса.



На первой стадии изготавливается полимерный лайнер:

- Экструзия лайнера
- Калибровка и охлаждение
- Намотка на барабан

После завершения процессов охлаждения, кристаллизации и стабилизации геометрии лайнер поступает на вторую стадию, где осуществляется формирование композитной структуры:

- Размотка лайнера
- ИК-преднагрев поверхности
- Нанесение и консолидация армирующей системы
- Нанесение наружной оболочки
- Охлаждение
- Намотка на барабан

Основная идея двухстадийного процесса заключается в разделении операций экструзии лайнера и формирования армирующей системы, что позволяет независимо оптимизировать каждую стадию производства.

Потенциальные преимущества

1. Армирование стабилизированного лайнера

Главным преимуществом двухстадийного процесса является то, что армирование выполняется на лайнере, в котором уже завершены основные процессы:

- кристаллизации;
- объемной усадки;
- релаксации внутренних напряжений;
- стабилизации геометрических размеров.

В результате значительно уменьшается вероятность изменения диаметра лайнера после формирования армирующей системы, обеспечивается более стабильное натяжение UD-ленты и повышается точность соблюдения расчетного угла укладки.

Это создает значительно более предсказуемые условия формирования первого несущего слоя ТСП.

2. Высокая технологическая гибкость

Разделение производства лайнера и армирования существенно расширяет возможности производственного комплекса.

На одной линии армирования можно выпускать трубы:

- различных диаметров;
- различных классов рабочего давления;
- с различным количеством армирующих слоев;
- с использованием различных типов UD-лент;
- для различных транспортируемых сред.

При необходимости становится возможным выполнение повторных циклов армирования без каких-либо изменений конфигурации экструзионного участка.

Это особенно важно при изготовлении труб высокого давления, где архитектура трубы может включать несколько десятков армирующих слоев.

3. Независимая оптимизация процесса армирования

Во второй стадии линия армирования превращается в самостоятельный высокотехнологичный производственный комплекс, включающий:

- системы ИК-преднагрева;
- автоматизированные системы укладки UD-ленты;
- системы контроля натяжения;
- системы контроля положения ленты;

- узлы консолидации;
- системы управляемого охлаждения.

В отличие от одностадийной схемы, параметры армирования могут оптимизироваться независимо от режима работы экструдера лайнера.

Однако именно здесь возникает новый инженерный вызов.

Основные недостатки

1. Тепловая история армирующей системы становится новым объектом управления

Устраняя проблему нестабильного лайнера, двухстадийный процесс переносит основной технологический вызов на следующий уровень — управление тепловой историей армирующей системы.

Каждый армирующий слой проходит последовательность операций:

- предварительный нагрев;
- укладка UD-ленты;
- консолидация;
- частичное охлаждение.

Однако при прохождении трубы через последующие обмоточные машины ранее сформированные слои вновь подвергаются тепловому воздействию.

Таким образом, каждый новый цикл армирования изменяет тепловую историю уже сформированной части композитной структуры.

Именно поэтому объектом управления становится уже не отдельная операция консолидации, а вся последовательность тепловых циклов, которым подвергается каждый слой армирующей системы.

2. Накопление тепла в многослойной армирующей системе

Современные линии армирования обычно включают от четырех до восьми обмоточных машин, а для труб высокого давления их количество может достигать двенадцати или шестнадцати.

Каждая обмоточная машина последовательно вносит дополнительную

тепловую энергию в уже сформированную композитную структуру.

В результате по мере продвижения трубы по линии происходит постепенное накопление тепла внутри армирующей системы.

При отсутствии автоматизированного управления температурными циклами это может привести к:

- повторному размягчению нижних армирующих слоев;
- локальной расконсолидации межслойных соединений;
- изменению остаточных напряжений;
- изменению морфологии термопластичной матрицы.

Поэтому современная линия армирования должна рассматриваться не как совокупность отдельных обмоточных машин, а как единая система управления тепловыми циклами консолидации.

3. Нанесение наружной оболочки как завершающий тепловой цикл

После завершения формирования армирующей системы на ее поверхность непосредственно наносится наружная термопластичная оболочка.

Нередко считается, что высокая температура расплава оболочки автоматически обеспечивает качественное аутогезионное соединение с армирующей системой. Однако подобное представление является чрезмерным упрощением.

В двухэтапном процессе температура поверхности армирующей системы перед нанесением оболочки не является независимым технологическим параметром.

Она формируется как результат предыдущих операций:

- ИК-сплавания последнего армирующего слоя;
- консолидации последнего слоя;
- последующего частичного охлаждения армирующей системы.

При этом указанные режимы выбираются прежде всего исходя из необходимости обеспечить оптимальные условия консолидации, кристаллизации и стабилизации **последнего армирующего**

слоя, а не для формирования оптимального состояния поверхности под нанесение наружной оболочки.

В то же время температурный профиль расплава оболочки определяется требованиями переработки материала оболочки и условиями стабильной работы экструдера.

Следовательно, в двухэтапном процессе температура поверхности армирующей системы и температура расплава оболочки являются **двумя взаимозависимыми параметрами, которые оптимизируются по различным критериям.**

Это не гарантирует формирования оптимального температурного окна для образования прочного аутогезионного соединения между армирующей системой и наружной оболочкой.

Более того, дополнительный тепловой импульс от расплава оболочки воздействует на композитную структуру, в которой еще продолжают процессы:

- кристаллизации;
- объемной усадки;
- релаксации внутренних напряжений.

При неблагоприятном сочетании температурных режимов это может привести к локальному изменению теплового баланса армирующей системы, повторному размягчению отдельных межслойных границ и снижению степени консолидации ранее сформированных слоев.

Именно это ограничение является одним из фундаментальных недостатков двухэтапной архитектуры.

Вывод по двухстадийному процессу

Отсутствие возможности независимо подготовить поверхность армирующей системы перед нанесением оболочки означает, что параметры двух различных процессов — **консолидации последнего армирующего слоя и формирования интерфейса "армирующая система — наружная оболочка"** — вынужденно

объединяются в единый компромиссный технологический режим.

Таким образом, по мере развития архитектуры ТСП возникает принципиально новая инженерная задача. На завершающем этапе двухстадийного процесса одновременно протекают два различных физико-химических процесса:

- завершение формирования армирующей системы;
- образование аутогезионного соединения между армирующей системой и наружной оболочкой.

Каждый из этих процессов имеет собственное оптимальное температурное окно, собственную кинетику кристаллизации и собственные требования к тепловому режиму. Поскольку в двухстадийной архитектуре они реализуются практически одновременно, технолог вынужден искать компромисс между двумя независимыми задачами.

По мере увеличения рабочих давлений, числа армирующих слоев и требований к долговечности ТСП такой компромисс становится все менее приемлемым, и является одним из основных ограничений дальнейшего развития двухэтапной технологии.

2.3. Трехэтапный процесс как реализация концепции Thermal History Management of TCP Manufacturing Process

Почему трехэтапный процесс стал закономерным этапом развития технологии ТСП

На ранних этапах развития технологии ТСП основными критериями совершенствования производственных линий считались:

- увеличение линейной скорости производства;
- сокращение количества технологических операций;
- снижение капитальных затрат.

Такой подход был вполне оправдан на этапе становления технологии, когда основное внимание уделялось созданию работоспособного производственного процесса.

Однако по мере повышения рабочих давлений, увеличения диаметров труб, расширения номенклатуры транспортируемых сред и ужесточения требований нефтегазовой отрасли и водородной энергетики стало очевидно, что дальнейшее развитие технологии определяется уже не скоростью намотки UD-ленты и не количеством технологических операций.

Основной инженерной задачей становится обеспечение **воспроизводимого формирования композитной структуры трубы**, способной сохранять свои свойства в течение десятков лет эксплуатации.

Это означает, что каждый технологический этап должен решать собственную физическую задачу:

- изготовление стабильного полимерного лайнера;
- формирование полностью консолидированной армирующей системы;
- образование долговечного аутогезионного соединения между армирующей системой и наружной оболочкой.

Попытка решить все эти задачи в рамках единого теплового цикла неизбежно приводит к компромиссам между различными технологическими режимами.

Следовательно, дальнейшее совершенствование производственных комплексов должно быть направлено не на объединение технологических операций, а на создание условий для их **независимой оптимизации**.

Именно эта логика лежит в основе трехэтапной архитектуры производства ТСП.

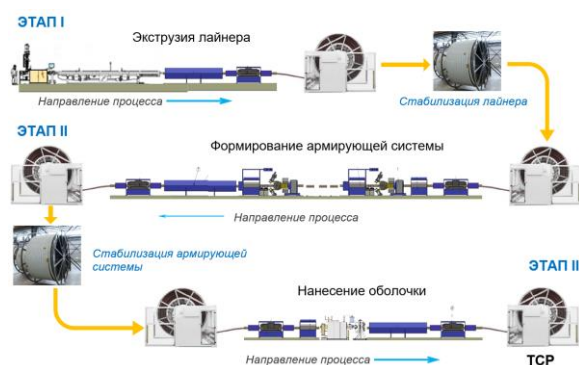
От разделения технологических операций к управлению формированием композитной структуры

Трехэтапный процесс появился не как попытка усложнить технологию производства ТСП.

Его появление стало следствием невозможности одновременно оптимизировать несколько независимых процессов формирования композитной структуры в рамках единого теплового цикла.

По мере развития технологии ТСП стало очевидно, что процессы формирования армирующей системы и образования аутогезионного соединения между армирующей системой и наружной оболочкой требуют различных температурных режимов, различных скоростей охлаждения и различных условий стабилизации материала.

Именно необходимость независимого управления этими процессами привела к формированию трехэтапной архитектуры производства.



В отличие от одно- и двухэтапных процессов, трехэтапная архитектура разделяет производство ТСП на три самостоятельные стадии, каждая из которых имеет собственную физическую цель и собственную систему управления.

Стадия 1

- Экструзия лайнера
- Калибровка
- Контролируемое охлаждение
- Полная стабилизация лайнера

Стадия 2

- Размотка лайнера
- ИК-преднагрев поверхности лайнера
- Предварительный нагрев UD-ленты
- Формирование армирующей системы
- Полное плавление
- Консолидация
- Контролируемое частичное охлаждение
- Полная стабилизация армирующей системы

Стадия 3

- Размотка армированного полуфабриката
- ИК-преднагрев поверхности
- Экструзия наружной оболочки
- Контролируемое охлаждение
- Финальная стабилизация конструкции

Главной особенностью данной архитектуры является то, что **каждая стадия завершается стабилизацией структуры перед переходом к следующему этапу**.

Формирование полностью связанной композитной конструкции

Трехэтапный процесс представляет собой процесс **консолидации на месте (in-situ consolidation)**, в котором все элементы конструкции последовательно термически соединяются между собой, образуя единую полностью связанную (*fully bonded*) композитную стенку.

Процесс армирования начинается с предварительного нагрева в управляемой инфракрасной печи поверхности полностью

стабилизированного лайнера. Предварительный нагрев обеспечивает достижение поверхностью материала температуры, необходимой для образования аутогезионного соединения перед прохождением через обмоточную машину (*Wrapping Machine*).

После укладки UD-ленты зона контакта между лентой и поверхностью лайнера (или предыдущего армирующего слоя) подвергается локальному нагреву в ИК-печи полного сплавления, где температура может превышать температуру плавления полимерной матрицы.

Дополнительное повышение эффективности процесса достигается при использовании независимой системы предварительного нагрева самой UD-ленты.

Такой подход обеспечивает:

- снижение температурного градиента в зоне контакта;
- ускорение формирования аутогезионного соединения;
- уменьшение внутренних напряжений;
- снижение риска дефектов подготовки армирующего материала, связанных с деформацией волокон, недостаточным натяжением ленты и локальными нарушениями укладки.

Консолидация как основной этап формирования структуры

После зоны полного сплавления материал проходит через устройство консолидации.

Как правило, функцию устройства консолидации выполняет уплотняющий ролик или непрерывная уплотняющая лента, создающие необходимое контактное давление.

Именно в этой зоне происходит формирование окончательной межслойной структуры за счет:

- непосредственного контакта поверхностей;
- взаимной диффузии полимерных цепей;
- молекулярного зацепления (*polymer chain interdiffusion*);

- образования аутогезионного соединения.

Фактически скорость движения трубы определяется не столько производительностью оборудования, сколько скоростью завершения процессов аутогезии и консолидации.

Следовательно, линейная скорость линии является производной скорости формирования качественного межслойного соединения.

Технологическое окно консолидации

Процесс консолидации определяется сочетанием трех взаимосвязанных параметров:

- температуры материала;
- давления устройства консолидации;
- времени контакта (или линейной скорости процесса).

Именно совокупность этих параметров определяет **технологическое окно консолидации**, в пределах которого возможно получение полностью связанной композитной структуры без возникновения внутренних дефектов.



С физической точки зрения процесс можно условно разделить на несколько стадий:

1. локальное плавление поверхности;
2. неизотермическая консолидация;
3. взаимная диффузия макромолекул;
4. контролируемое охлаждение;
5. кристаллизация;
6. объемная усадка;
7. релаксация остаточных напряжений.

Особое значение имеет стадия кристаллизации, поскольку именно она во многом определяет окончательную морфологию полимерной матрицы и,

следовательно, механические свойства готовой трубы.

Независимое управление тепловой историей

Принципиальным отличием трехэтапной архитектуры является возможность независимого управления тепловой историей каждого структурного элемента трубы.

Это означает, что:

- лайнер полностью стабилизируется до начала армирования;
- армирующая система полностью консолидируется и стабилизируется до нанесения наружной оболочки;
- наружная оболочка формируется на уже стабилизированной композитной конструкции после независимого ИК-преднагрева поверхности армирующей системы.

В результате становится возможным независимо оптимизировать:

- процессы консолидации армирующей системы;
- процессы формирования интерфейса между армирующей системой и наружной оболочкой.

Именно это устраняет фундаментальное ограничение двухэтапного процесса, в котором один температурный режим вынужден одновременно обеспечивать завершение консолидации последнего армирующего слоя и подготовку поверхности под нанесение оболочки.

Интеллектуальное управление технологическим окном как инструмент повышения производительности

Традиционно производительность линии ТСП связывают с механическими характеристиками оборудования:

- скоростью перемещения трубы;
- мощностью ИК-печей;
- количеством обмоточных машин;
- производительностью экструдеров.

Однако такой подход отражает лишь возможности оборудования и не описывает

реальные физические ограничения процесса формирования композитной структуры.

В действительности линейная скорость производства ограничивается не максимальной скоростью перемещения трубы, а возможностью обеспечить завершение процессов аутогезии, взаимной диффузии макромолекул и консолидации в зоне контакта.

Иными словами, максимальная производительность определяется способностью технологического процесса оставаться внутри допустимого технологического окна консолидации.

Если температура оказывается недостаточной, снижается степень межслойной диффузии и ухудшается качество соединения.

Если температура становится чрезмерной или увеличивается время теплового воздействия, возникает риск повторного размягчения ранее сформированных слоев, изменения морфологии полимерной матрицы и нарушения теплового баланса композитной структуры.

Следовательно, повышение производительности невозможно рассматривать как простое увеличение линейной скорости.

Оно должно сопровождаться непрерывным управлением параметрами технологического окна.

Роль автоматизированной системы управления

Именно здесь принципиальное значение приобретают современные автоматизированные системы управления производственным процессом.

Если традиционная система автоматизации поддерживает заданные значения температуры отдельных нагревателей или скорости отдельных приводов, то система следующего поколения должна управлять уже самим процессом формирования композитной структуры.

Такая система в режиме реального времени может регулировать:

- температуру ИК-преднагрева;
- температуру зоны полного сплавления;
- температуру предварительного нагрева UD-ленты;
- давление устройства консолидации;
- скорость движения трубы;
- скорость охлаждения после каждой стадии;
- тепловой баланс линии в целом.

При этом целью управления становится не поддержание отдельных технологических параметров, а сохранение процесса внутри оптимального технологического окна консолидации на протяжении всего производственного цикла.

Производительность как следствие качества управления

В такой постановке задачи увеличение линейной скорости становится следствием более совершенного управления процессом, а не самоцелью.

Чем точнее система автоматизации управляет тепловой историей материала и поддерживает оптимальные условия консолидации, тем выше допустимая скорость формирования композитной структуры без ухудшения качества межслойного соединения.

Таким образом, производительность производственного комплекса определяется не только конструкцией оборудования, но и **уровнем интеллектуального управления процессом**.

Именно поэтому развитие TCP-производства следует рассматривать как переход:

- от механизации — к автоматизации;
- от автоматизации — к интеллектуальному управлению технологическим окном;
- от управления технологическим окном — к управлению **тепловой историей формирования композитной структуры**.

Следовательно, задача автоматизированной системы управления заключается не в поддержании заданной температуры

отдельных нагревателей или скорости отдельных приводов, а в непрерывном управлении технологическим окном консолидации и тепловой историей формирования композитной структуры трубы.

Концепция Thermal History Management of TCP Manufacturing Process

Таким образом, трехэтапная архитектура впервые позволяет рассматривать производственный комплекс TCP не как совокупность экструдеров, ИК-печей и обмоточных машин, а как систему управления последовательностью термических и термомеханических процессов, формирующих композитную структуру трубы.

Иными словами, объектом управления становится уже не температура отдельных технологических операций, а **тепловая история каждого структурного элемента трубы** на протяжении всего производственного цикла.

Под концепцией **Thermal History Management of TCP Manufacturing Process** предлагается понимать систему управления последовательностью термических и термомеханических воздействий на каждый структурный элемент трубы, обеспечивающую контролируемое формирование морфологии полимерной матрицы, межслойной консолидации, кристаллизации и остаточного напряженного состояния на всех стадиях производства.

От управления технологическими операциями к управлению физическими процессами

Концепция **Thermal History Management** естественным образом приводит к более фундаментальному принципу проектирования производственных комплексов TCP.

Производственный комплекс TCP должен проектироваться не вокруг технологических операций, а вокруг

физических процессов, происходящих в материале.

При традиционном подходе архитектура линии описывается последовательностью оборудования:

- Экструзионная линия лайнера
- Линия армирования
- Экструзионная линия наружной оболочки

Такой подход ориентирован преимущественно на организацию технологического процесса.

Эволюция принципов проектирования производственных комплексов ТСР

Этап	Объект проектирования	Главный критерий
I	Оборудование	Работоспособность линии
II	Технологические операции	Линейная скорость
III	Физические процессы	Формирование композитной структуры
IV	Управление тепловой историей формирования композитной структуры (Thermal History Management)	Максимальная производительность при гарантированном качестве и воспроизводимости свойств трубы

В предлагаемой концепции производственный комплекс рассматривается как система управления физическими процессами формирования материала:

- Стабилизация лайнера
- Формирование интерфейса «лайнер— армирующая система»
- Консолидация армирующей системы
- Стабилизация армирующей системы

- Формирование интерфейса «армирующая система — наружная оболочка»
- Финальная стабилизация конструкции

В этом случае оборудование становится лишь инструментом реализации заданной последовательности физических процессов.

Именно такой подход позволяет перейти от проектирования производственной линии к проектированию управляемого процесса формирования полностью связанной композитной конструкции, в котором долговременная надежность ТСР определяется не отдельными технологическими операциями, а воспроизводимостью всей термомеханической истории материала.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что развитие технологии ТСР сопровождается изменением самого подхода к проектированию производственных комплексов. Если на ранних этапах основное внимание уделялось оборудованию и последовательности технологических операций, то современное развитие технологии все в большей степени определяется управлением физическими процессами формирования композитной структуры трубы.

В этих условиях эффективность производственного комплекса определяется не только его техническими характеристиками, но прежде всего способностью обеспечивать воспроизводимое формирование полностью связанной композитной конструкции с заданными эксплуатационными свойствами.

На основании проведенного анализа принципы проектирования производственных комплексов ТСР нового поколения могут быть сформулированы следующим образом.

Принципы проектирования производственных комплексов ТСП нового поколения

1. ТСП следует рассматривать не как армированную полимерную трубу, а как полностью связанную термопластичную композитную конструкцию, эксплуатационные свойства которой определяются качеством формирования всей композитной структуры.
2. Основной задачей производственного комплекса является не последовательное выполнение технологических операций, а управляемое формирование композитной структуры трубы на протяжении всего производственного цикла.
3. Производительность комплекса определяется не только линейной скоростью линии, но и архитектурой трубы, количеством армирующих слоев, числом обмоточных машин и возможностью обеспечения стабильной консолидации на каждой стадии процесса.
4. Качество ТСП определяется не отдельными технологическими операциями, а согласованным управлением процессами нагрева, консолидации, кристаллизации, охлаждения и стабилизации материала.
5. Разделение процессов изготовления лайнера, формирования армирующей

системы и нанесения наружной оболочки позволяет независимо оптимизировать физические процессы, протекающие на каждой стадии производства.

6. Современные автоматизированные системы управления должны обеспечивать непрерывное управление физическими процессами формирования композитной структуры, поддерживая оптимальное технологическое окно на протяжении всего производственного цикла.

7. Производственный комплекс ТСП должен проектироваться не вокруг технологических операций, а вокруг физических процессов, протекающих в материале.

Таким образом, современное развитие технологии ТСП характеризуется переходом от проектирования технологических линий к проектированию управляемых процессов формирования композитной структуры, протекающих в материале на протяжении всего производственного цикла. Именно этот подход составляет сущность концепции **Thermal History Management of TCP Manufacturing Process** и определяет дальнейшее развитие производственных комплексов ТСП.

О разработчиках концепции

Настоящая статья является результатом совместной работы специалистов Fartrouven R&D, объединяющей опыт разработки технологий производства термопластичных композитных труб TCP/RTP (полимерно-армированных труб связанной конструкции), проектирования производственных комплексов и инженерного анализа физических процессов формирования композитной структуры трубы.

Представленная концепция Thermal History Management of TCP Manufacturing Process отражает инженерный подход авторов к дальнейшему развитию технологий промышленного производства полностью связанных термопластичных композитных труб и основана на переходе от проектирования отдельных технологических операций к управлению процессами формирования композитной структуры на протяжении всего производственного цикла.

Fartrouven R&D — проектирование и создание производственных комплексов TCP

Fartrouven R&D специализируется на разработке инженерных решений для промышленного производства термопластичных композитных труб TCP/RTP и создании производственных комплексов полного цикла.

Компания выполняет комплекс работ:

- разработка концепции TCP-завода с учетом требований к продукции и производственной программы;
- проектирование технологической архитектуры производственного комплекса;
- разработка и поставка оборудования для производства TCP/RTP труб;
- разработка и оптимизация технологических процессов;
- внедрение систем автоматизированного управления производственными процессами;
- инженерное сопровождение проекта на всех этапах — от предварительного анализа и проектирования до запуска производства и выхода предприятия на проектные показатели.

Особое внимание Fartrouven R&D уделяет обеспечению воспроизводимого качества TCP за счет управления процессами консолидации, температурными режимами и формированием межслойных соединений композитной структуры трубы.

Контакты

Fartrouven R&D

Rua Fonte Cabeço D'el Rey, 19
2400-719 Leiria, Portugal

Website: <https://fartrouven.pt>
E-mail: plant@fartrouven.pt