

УДК 629.7

**В. А. КОСТРУБ**, канд. техн. наук, доц. ВНУ ім. В. Даля, Луганск;  
**А. П. КРАВЧЕНКО**, д-р техн. наук, проф., завідуючий кафедрою автоники і управління на транспорті ВНУ ім. В. Даля

## **АНАЛИЗ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕТЕЛЬНО-ПУЛТРУЗИОННОГО ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ СИЛОВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Проведен анализ процесса полимеризации композитных стержневых сложноармированных элементов, применяемых в качестве элементов силового набора автомобильных конструкций. Приведены рекомендации по оптимальному выбору технологических параметров.

**Ключевые слова:** композитный стержень, полимеризация, техпроцесс, армирующее волокно, связующее, ролтрузия, степень наполнения.

**Введение.** Как известно, конструкции на основе композиционных материалов обладают целым рядом уникальных свойств, актуальных при создании агрегатов и конструкций автомобильной техники. Это и коррозионная стойкость, и ударопрочность, и высокая вибро- и знергоемкость. Широкое применение композиционных материалов в конструкциях различного назначения обуславливает создание более совершенных композитных структур и разработку технологических процессов для их реализации в конкретных изделиях. В этой связи значительный интерес представляют непрерывные процессы получения длинномерных стержневых изделий на основе волокнистых композитов.

**Анализ основных достижений и литературы.** Стержневые композитные профили находят применение в качестве силовых и подкрепляющих элементов автомобильных конструкций, причем характер их нагружения обуславливает действие нагрузки преимущественно в осевом направлении [1]. Такого рода стержневые элементы изготавливаются, в большинстве своем, методом пултрузии, позволяющем получать длинномерные изделия с высокими скоростями изготовления. Однако пултрузионные композитные профили, в силу однонаправленности армирования, обладают невысокими сдвиговыми и трансверсальными характеристиками и низкой прочностью при продольном сжатии, величину которых определяют параметры матрицы и адгезия между волокнами и связующим. Для устранения указанных недостатков целесообразно вводить один или несколько слоев вспомогательной трансверсальной арматуры путем спиральной обмотки, оплетки и т.п. Однако реализация такого вспомогательного армирования оказывается весьма затруднительной в сочетании с непрерывным процессом формования при пултрудировании [2, 3].

**Цель исследования, постановка задачи:** исследовать и разработать технологический процесс ролтрузии, позволяющий совместить пространственное армирование с непрерывным формованием длинномерных профилируемых стержней на основе волокнистых композитов для элементов силового набора автомобильных конструкций. Отличительными особенностями такого метода должно являться введение в технологический регламент операции нанесения вспомогательной арматуры, и также использование в качестве формующего тракта приводных профилированных роликов (рис. 1).

Причем, синхронизация скорости протягивания со скоростью вращения формующих роликов должна позволять значительно снизить деформативности армирующего материала и искажение его структуры в процесс формования.

© В. А. Коструб, А. П. Кравченко, 2013

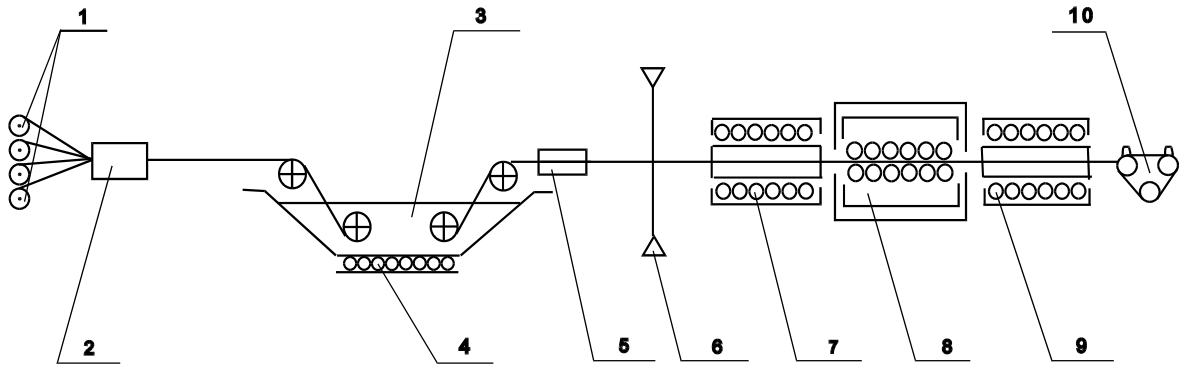


Рисунок 1 - Схема непрерывного технологического процесса формирования профиля методом “ролтрузии”: 1 - шпулярник; 2 - распределительное устройство; 3 - пропиточная ванна; 4 - нагревательный элемент; 5 - отжимная фильера; 6 - обмоточный узел; 7 - термокамера предварительной обработки; 8 - формующие ролики; 9 - полимеризационная термокамера; 10 - протягивающее устройство

Важнейшей стадией процесса ролтрузии наряду с нанесением вспомогательной арматуры, является прохождение пропитанного термореактивным связующим волокнистого материала через зону формирования. Скорость процесса определяется в первую очередь скоростью полимеризации термореактивного связующего. Варьируемыми технологическими параметрами этой стадии процесса являются термокинетические параметры - распределение температурных полей в формующем роликовом тракте и скорость протягивания. В сочетании с длиной формующего тракта они определяют температурно-временные условия формирования профильного стержневого изделия. Установление взаимосвязи этих факторов с целью оптимизации режимов формирования (температурных полей формующего тракта, скорости и усилия протягивания) является чрезвычайно сложной задачей.

**Материалы исследований.** В формующем роликовом тракте происходит уплотнение армирующего наполнителя, перераспределение связующего в материале и его отверждение до степени, обеспечивающей формостабильность профильного изделия и допустимый уровень его физико-механических свойств. Связующее в результате реакции полимеризации претерпевает объемное расширение и усадку, а также релаксационные превращения при переходе из вязко-текучего состояния через гелеобразование в эластическое, а затем и в твердое стеклообразное состояние. При этом соотношение термокинетических параметров ролтрузионного процесса связано с мощностью нагревателей, длиной и теплоемкостью формующего тракта, а также с теплофизическими и адгезионными свойствами формируемого изделия и величиной экзотермического эффекта при отверждении.

Для описания взаимосвязи термокинетических параметров ролтрузионного процесса может быть использована упрощенная одномерная термокинетическая модель, основанная на решении связанной задачи теплопроводности и теплообмена в системе профиль-формирующий тракт с помощью общего уравнения Дамкелера для потока тепла в одном направлении [4, 5] и уравнения кинетики отверждения связующего

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = F(\lambda) \cdot e^{-E(\lambda)/RT(t)}; \quad (1)$$

$$\rho C_p S \frac{\partial T}{\partial t} - \psi S \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho C_p S V_{пр} \frac{\partial T}{\partial x} + h\Pi(T - T_{ср}) - \rho Q_0 S \frac{\partial \lambda}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность материала профиля;

$C_p$  - теплоёмкость материала профиля;

$S, \Pi$  - площадь и периметр поперечного сечения профиля, соответственно;

$\psi$  - коэффициент теплопроводности материала профиля;

$h$  - коэффициент теплопередачи системы профиль-среда;

$T_{ср}$  - температура среды;

$T(t)$  - температура профиля;

$t$  - время;

$Q_0$  - полный тепловой эффект реакции отверждения;

$\lambda$  - степень отверждения связующего.

Данная модель позволяет учитывать экзотермический характер реакции отверждения и изменения теплофизических свойств формуемого профиля, которые определяются экспериментально. Указанная модель позволяет определить тепловой режим формуемого материала при нагревании и охлаждении, а также промежуточную и конечную степень отверждения связующего. При этом должны учитываться следующие технологические параметры процесса ролтрузии: размеры и формы армирующего тракта, исходя из поперечного сечения профиля и длины тракта  $L_\phi$ ; скорость протягивания  $V_{пр}$ , температуру нагревателей формирующего тракта  $T_\phi$ , предварительный подогрев профиля на входе в формирующий тракт до температуры  $T_0$  и начальную степень отверждения связующего  $\lambda_0$ .

В связи с этим возникает необходимость экспериментального определения теплофизических характеристик профиля, распределения температурных полей в формирующем тракте и формируемом материале, а также кинетических параметров изотермического отверждения связующего совместно с наполнителем.

**Результаты исследований.** Экспериментальные исследования указанных характеристик были проведены на действующей ролтрузионной установке при формировании прямоугольного профильного стержневого изделия на основе стекловолоконного армирующего наполнителя и эпоксидного связующего, модифицированного стеаратом цинка.

С этой целью отбирались образцы с учетом скорости, температуры и положения изделия в формирующем тракте. Определение степени отверждения связующего проводилось методом экстракции растворителем фракции связующего, не связанного химически с полимерной сеткой, результаты представлены на рис. 2, 3, 4. Их анализ показывает, что при соответствующем подборе скорости протягивания и температуры в формирующем тракте может быть получена требуемая степень отверждения связующего в изделии. Причем, увеличение температуры до  $250^{\circ}\text{C}$  не приводит к существенному повышению степени отверждения, а увеличение длины формирующего тракта позволяет повысить скорость протягивания, т.е. увеличить производительность процесса.

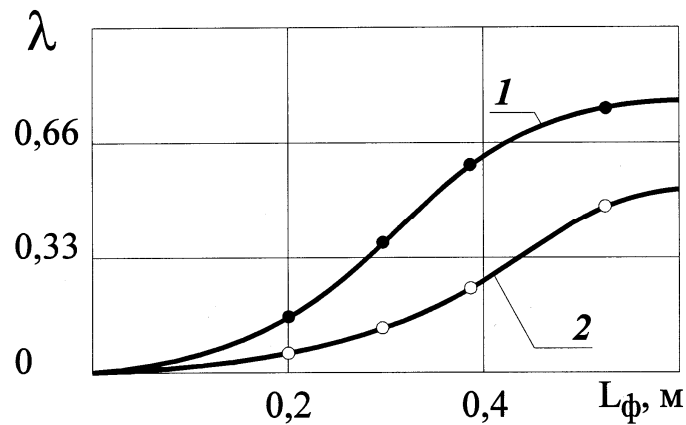


Рисунок 2 - Изменение степени отверждения стеклопластикового стержня по длине ролтрузионного тракта в зависимости от температуры формирования: 1 -  $T_{\phi} = 250^{\circ}\text{C}$ ; 2 -  $T_{\phi} = 160^{\circ}\text{C}$

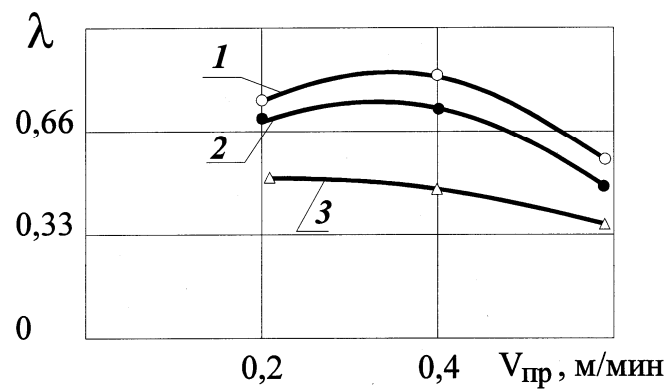


Рисунок 3 - Зависимость степени отверждения стеклопластикового стержня от скорости протягивания: 1 -  $T_{\phi} = 250^{\circ}\text{C}$ ; 2 -  $T_{\phi} = 220^{\circ}\text{C}$ ; 3 -  $T_{\phi} = 160^{\circ}\text{C}$

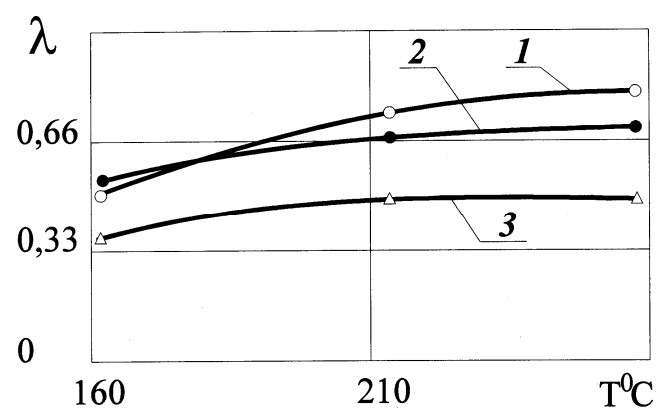


Рисунок 4 - Зависимость степени отверждения стеклопластикового стержня от температуры в формирующем тракте

Весьма важную роль в процессе отверждения изделия играет распределение температурных полей по длине формующего тракта, направленное изменение которых позволяет регулировать степень отверждения связующего в изделии. С этой целью были проведены исследования изменений температуры в формующем тракте и в формируемом профильном изделии.

Эксперименты показали, что распределение температурного поля по длине формующего тракта носит параболический характер с небольшим плато и смещается при изменении положения нагревателей (рис. 5, 6, 7).

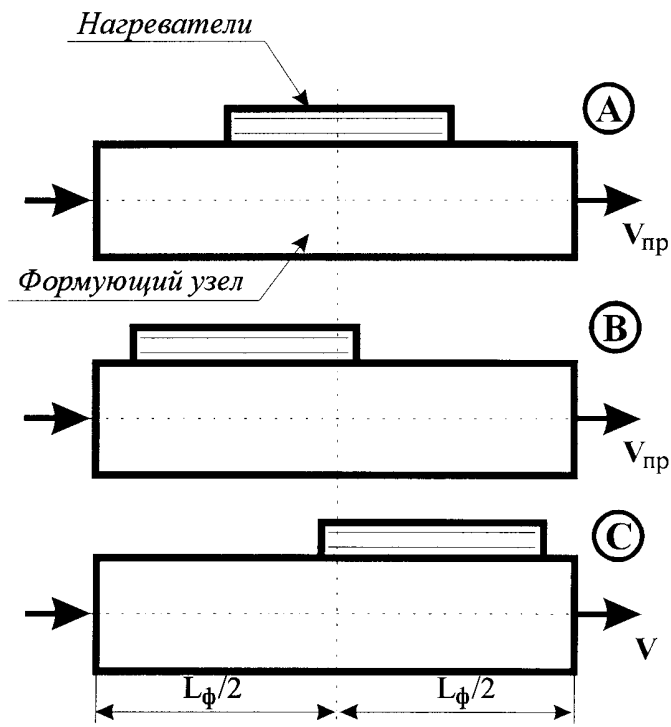


Рисунок 5 - Схема расположения нагревателей по длине формующего тракта

Влияние скорости протягивания на изменение температурного поля формующего тракта показано на рис. 8.

Как видно из представленных данных, по мере увеличения скорости протягивания пик температурного поля смещается к выходу из формующего узла, при этом несколько изменяется динамика процесса нарастания температуры, что говорит о целесообразности регулирования процесса полимеризации при определенной скорости протягивания. Было установлено, что максимальная температура материала на  $7 - 8^{\circ}\text{C}$  превышала температуру формующего узла, что связано, очевидно, с экзотермичностью процесса полимеризации.

С целью рационального выбора температурного режима процесса формования в образцах определялась степень отверждения связующего, результаты приведены на рис. 9. Как следует из полученных зависимостей, смещение нагревателей ко входу в формующий узел позволяет несколько увеличить степень полимеризации, причем с ростом скорости протягивания эта тенденция принимает более выраженный характер.

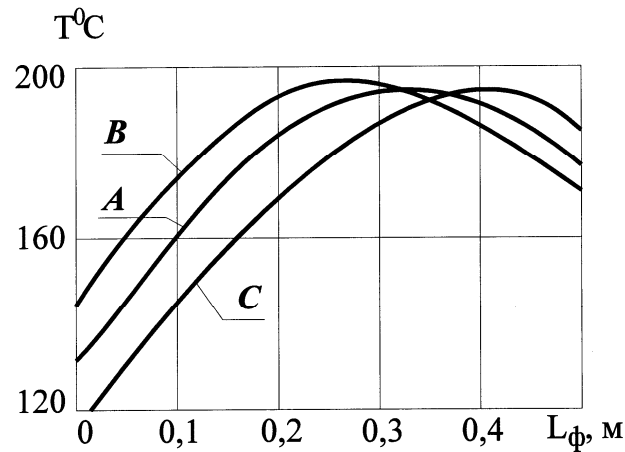


Рисунок 6 - Изменение температурного поля в формирующем тракте при различных положениях нагревателей ( $T_{\phi} = 220^{\circ}\text{C}$ ;  $V_{\text{пр.}} = 0,4$  м/мин)

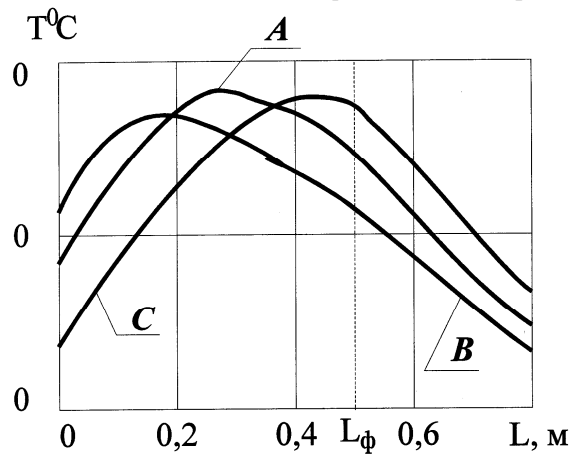


Рисунок 7 - Влияние расположения нагревателей по длине формирующего узла на изменение температуры в композите ( $V_{\text{пр.}} = 0,4$  м/мин;  $T_{\phi} = 220^{\circ}\text{C}$ )

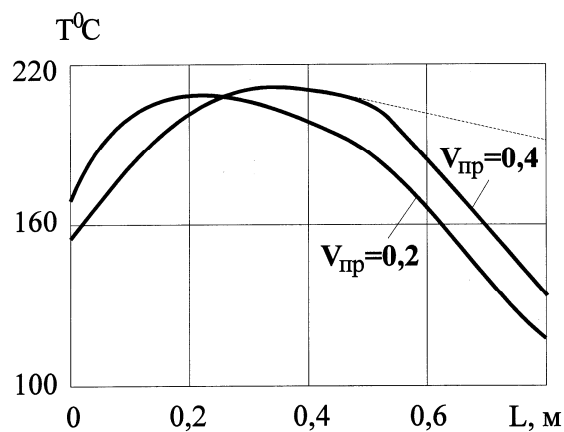


Рисунок 8 - Изменение температуры в композите при различной скорости протягивания (положение нагревателей А, температура нагревателей  $220^{\circ}\text{C}$ )

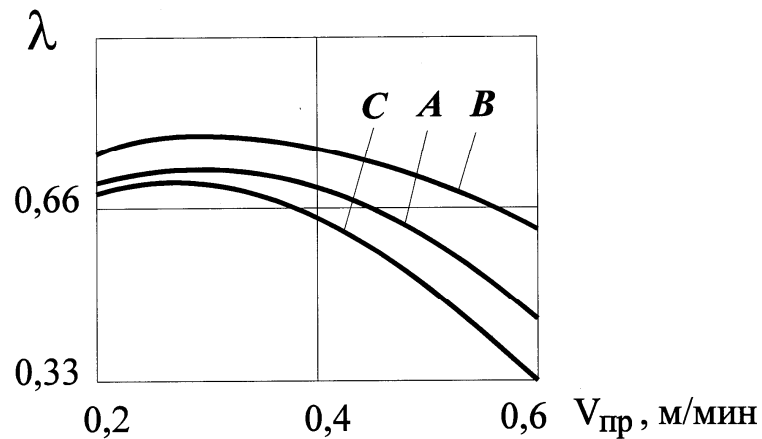


Рисунок 9 - Изменение степени полимеризации связующего в стеклопластиковых стержнях в зависимости от условий нагрева в формующем тракте и скорости протягивания

**Выводы.** Проведенные исследования режима термической обработки профильных стержневых изделий позволяют выбирать рациональное распределение температурных полей и оптимизировать скорость протягивания и длину формующего тракта при изготовлении стержневых композитных изделий методом ролтрузии.

**Список литературы:** 1. Бичков С.А. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів / С.А. Бичков, О.В. Гайдайчук, В.С. Гайдайчук [та ін.]. - К. ІСДО: - 1995 - 376 с. 2. Коструб В.А. Исследование процесса формования композитов методом ролтрузии // Слоистые композиционные материалы-98: Сборник трудов конференции / Волгоград.гос.тех.ун-т, Волгоград, 1998, С.322-323. 3. Коструб В.А. Процесс ролтрузии как метод создания сложноармированных композиционных стержневых изделий // Композиционные материалы в промышленности (Славполикком-98): Тезисы докладов Международной конференции. Киев: АТМ Украины. - С. 87. 4. Сумм Б.Д.. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов - М.: Химия - 1976. - 232 с. 5. Лыков А.В. Тепломассообмен. - М.: Энергия. - 1972. - 560 с.

Надійшла до редколегії 13.05.2013

УДК 629.7

**Анализ термокинетических параметров плетельно-пултрузионного процесса формования композитных стержней для силовых автомобильных конструкций / В. А. Коструб, А. П. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 30 (1003). – С. 107–113. – Бібліогр.: 5 назв.**

Проведено аналіз процесу полімеризації композиційних стержневих складноармованих елементів, що використовуються в якості елементів силового набору автомобільних конструкцій. Надано рекомендації щодо оптимального вибору технологічних параметрів.

**Ключові слова:** композитний стрижень, техпроцес, полімеризація, армуюче волокно, зв'язуючи, ролтрузія, ступінь наповнення.

The organized analysis of the polymerization process of composite pivotal element, applicable as element of the power set car constructions. The broughted recommendations on optimum choice technological parameter.

**The keywords:** composite peg, polymerization, technological process, arming filament, connecting, degree of the filling.