

А. Г. Макухин, канд. техн. наук, доц., **Г. В. Сыровой**, ст. пр.,

А. Ю. Ратушняк, ассист.

Луганский государственный университет имени Владимира Даля

Телефон: +380667170901; E-mail: siiiig@i.ua

ПУЛТРУЗИЯ, КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье проведен анализ изготовления стержневых изделий силового назначения выполненных из композиционного материала методом пултрुзии. Дано описание данного метода и рассмотрен технологический процесс формообразования изделий заданного профиля, конструкция станка и используемого материала, обеспечивающих его эффективную работу при эксплуатации.

Предложенный метод пултрузионного формования - это экономичный метод производства прямых композитных изделий высокой прочности с постоянной площадью поперечного сечения.

Цель работы – анализ метода пултрузии, как технологического процесса формования давлением сложнопрофильных стержневых изделий силового назначения выполненных из композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционные материалы, пултрузия, шпулярник, полимеры, волокна, фильера.

A. G. Makuhin, G. V. Syrovoy, A. Y. Ratushnyak

PULTRUSION AS A TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS

The article analyzes the production of core products of power purpose made of a composite material pultrusion. A description of the method and process of forming considered products given profile, the design of the machine and material used to ensure its effective operation in the operation.

Proposed pultrusion molding method - an economical method of producing direct production of high strength composites with constant cross-sectional area.

Purpose - analysis of pultrusion as pressure molding process complex-purpose power rod articles made of composite materials

Keywords: composite materials, method, pultrusion, spool, polymers, fibers, dyes.

1. Введение

Использование современных композиционных материалов позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики изделий, снизить вес конструкций, в ряде случаев упростить технологический процесс получения изделий. Особенно актуально это по отношению к элементам конструкций авиационной, ракетной, транспортной техники, судостроения, энергетики в последнее время строительства и станкостроения. Значительную часть этих изделий составляют стержневые конструкции различных профилей поперечного сечения, используемых в качестве силовых или подкрепляющих элементов конструкций – тяг, лонжеронов, стрингеров, окантовки, каркасов, ферменных конструкций, балок, рам, валов и т.д. [1].

Однако, при производстве стержневых изделий силового назначения узким местом, сдерживающим разработку поточных методов их изготовления, является процесс формообразования изделия заданного профиля и конструкции материала, обеспечивающих их эффективную работу при эксплуатации.

Одним из путей решения данного вопроса является использование метода пултрузионного формования как одного из перспективных методов изготовления стержневых изделий. Основными его достоинствами являются высокая производительность,

возможность непрерывного получения изделий любой длины и любого профиля. Интенсивное развитие производства изделий из полимерных композиционных материалов способствовало разработке разнообразных вариантов технологического процесса изготовления изделий с использованием метода пултрузии [2-5].

Наибольшее развитие пултрузия получила в США, где функционируют более 150 производственных линий для пултрузии. Ведущими в этой области являются фирмы «Goldsworthy Engineering» и «Pultrusion Technology». Они выпускают стандартные установки, позволяющие получать профили с площадью поперечного сечения до 150 см² [6].

В России метод пултрузии стал использоваться с 1994 года на ООО НПКФ «РАНТЕС» и компании "Экструзионные машины" при "НИКИМТ" [3] и в ближайшие годы можно ожидать всплеск спроса на пултрузионное оборудование. Это связано со многими причинами: относительно не высокой ценой оборудования, рост интереса к композитным материалам, политикой государства в сфере энергосбережения и снижения стоимости строительства. Вступил в действие Федеральный закон №261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», Министерством регионального развития утверждена «Стратегия развития промышленности строительных материалов до 2020 г.» [6].

Настоящий же скачок в использовании метода пултрузии, стимулируемый освоением производственного оборудования международных компаний и развитием технологии и собственных know - how произошел у китайских компаний. «Owens Corning». На сегодняшний день насчитывает в стране около 100 пултрузионных производств (70% из них расположены в восточном Китае) и 400 пултрузионных установок, 360 из которых уже произведены в Китае. Большая часть производимой продукции идет на экспорт [5].

2. Основное содержание и результаты работы

Учитывая выше изложенное, целью настоящей работы является анализ метода пултрузии, как технологического процесса формования давлением сложнопрофильных стержневых изделий силового назначения из композиционных материалов.

Для этого рассмотрим основные технологические операции пултрузии:

- размотка волокнистого наполнителя со шпулярника;
- пропитка армирующих волокон полимерным связующим;
- формование заготовки в предварительных фильерах;
- окончательное формование профиля и фиксирование его формы в результате отверждения полимерной матрицы в обогреваемой формующей фильере;
- протягивание и порезка профиля на части требуемой длины;
- дополнительная термообработка изделий.

Армирующий волокнистый наполнитель, протягивается с заданной скоростью со шпулярника через ванну с полимерным связующим и зону предварительного формования, где пучку волокон придается форма требуемого профиля с предварительным уплотнением и одновременным удалением избытка связующего. Затем материал поступает в металлическую фильеру, нагретую до температуры, обеспечивающей заданную скорость и глубину процесса отверждения связующего. Здесь происходит окончательное формование профиля и фиксируется его форма, после чего длинномерное изделие подается тянущим механизмом в отрезное устройство. Полученные таким образом профили точно соответствуют требуемому размеру сечения и не нуждаются в даль-

нейшей механической обработке. На рис. 1 показана принципиальная схема процесса пултрузии.

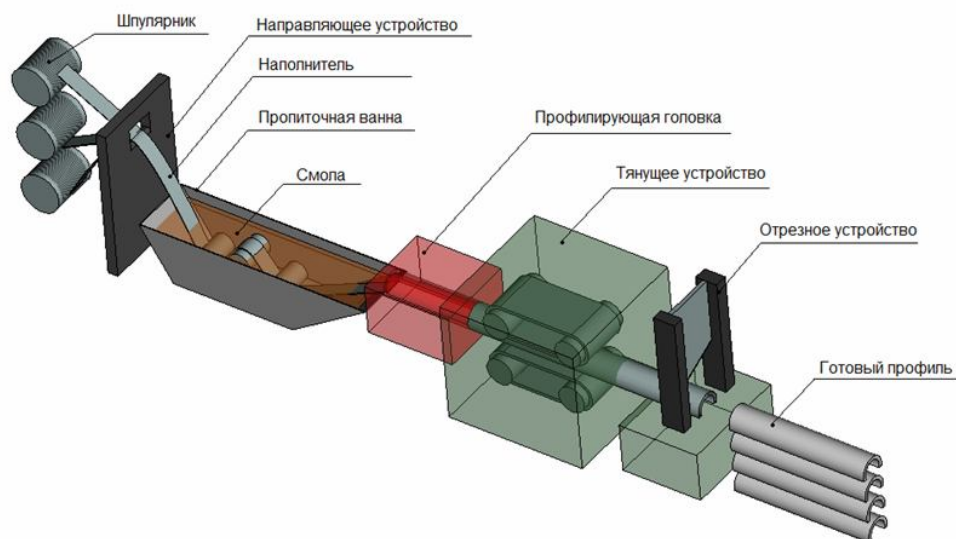


Рис. 1 Схема процесса пултрузии

Шпулярник.

Шпулярник предназначен для размещения шпулей с волокном и представляет собой металлическую раму с горизонтальными осями. Для размещения крупногабаритных бобин, например, со стекловолокном, применяются шпулярники полочного типа. В этом случае размотка происходит изнутри бобин. Внешний вид такого шпулярника показан на рис. 2.



Рис. 2 Шпулярник полочного типа с системой предварительного натяжения продольной арматуры

Пропитка армирующих волокон

Пропитка волокнистого наполнителя обычно осуществляется протягиванием пучка волокон через ванну с полимерным связующим, имеющую систему прижимных и отжимных валиков. Для подогрева связующего до $t=60^{\circ}\text{C}$ с целью снижения его вязкости и улучшения смачивания волокон ванна снабжается подогревателями. Внешний вид пропиточно-отжимного устройства показан на рис. 3.

Для улучшения качества пропитки волокнистого наполнителя полимерным связующим производится подсушка инфракрасным источником при $t=80^{\circ}\text{C}$, расположенным над пучком волокна перед входом в пропиточную ванну. Расстояние между поверхностью пучка и источником регулируется таким образом, чтобы конвективный поток тепла, переносимый наполнителем, обеспечивал стабильный прогрев связующего в пропиточной ванне до требуемой температуры.



Рис. 3 Пропиточно-отжимное устройство

Для улучшения процесса пропитки разработан ряд методов инъекционного введения связующего [4].

Правильный выбор связующего позволяет увеличить химическую стойкость, теплостойкость, ударную и усталостную прочность материала. По мере того как осваивается промышленное производство смол и катализаторов, входящих в композиции, предназначенные специально для переработки этим методом, его производительность возрастает. Если раньше скорости пултрузии 0,6 ... 0,9 м/мин были нормой, то сейчас они увеличиваются до 4,6 ... 6,1 м/мин.

Этот резкий рост производительности обусловлен синергическим эффектом от модификации смол и усовершенствования технологии их отверждения. Применение высокочастотного нагрева наряду с традиционными способами нагрева не только увеличивает рабочие скорости, но и позволяет выпускать как простые крупные профильные изделия, так и такие, масса которых в пределах профиля резко изменяется

После ванны пропитанный пучок волокон поступает в систему предварительных фильер и направляющих устройств, где происходит дальнейшая пропитка наполнителя и удаление излишков связующего и пузырьков воздуха, выравнивание отдельных волокон, формирование сечения изготавливаемого профиля и равномерное распределение

волокон по сечению. Далее пучок волокон с небольшим избытком связующего поступает в обогреваемую фильеру, где происходит окончательное удаление избытка связующего и воздуха, выравнивание и формирование сечения профильного изделия, отверждение связующего.

Формование

Армирующий материал (стекловолокно), пропитанный смолой, протягивается через формообразующую фильеру, нагретую до температуры 150° С.

Формующая фильера представляет собой разъемную металлическую форму, рабочие поверхности которой отполированы и хромированы. Длина фильеры зависит от размера протягиваемого профиля, типа связующего, скорости процесса и обычно варьируется в пределах 300-1500 мм. Рабочий канал должен быть правильной геометрической формы с параллельными стенками и закругленными краями для предотвращения излома волокон.

Нагрев фильеры чаще всего осуществляется с помощью плоских электронагревателей. Однако с целью повышения производительности все большее применение находит высокочастотный индукционный нагрев, который позволяет увеличить скорость пултрузии. Наиболее важными параметрами любой системы нагрева фильеры является равномерность распределения температурного поля и возможность контроля температуры на всех этапах формования. Внешний вид фильер различных сечений для получения стержневых изделий или труб показан на рис 4.

Более качественные изделия получают в фильерах-термокамерах, имеющих значительную длину – до 2 метров [5]. При использовании связующих с низким содержанием летучих продуктов можно получить достаточно хорошие изделия со стабильными геометрическими размерами. Однако такой способ не нашел широкого применения, т.к. фильеры-термокамеры дороги в изготовлении и сложны в эксплуатации.



Рис. 4 Фильеры для формования изделий различных поперечных сечений

Известны способы формования изделий из композитов силовой опрессовкой, при которых размеры поперечного сечения и степень наполнения его волокнистой арматурой определяется усилием, создаваемым ленточным прессом.

Механизм протягивания

Устройства протягивания развились из простейшей прямой тяги, осуществляемой тросом или цепью, наматываемой на барабан. В настоящее время применяются два принципиально различных типа протягивающих устройства. В устройстве типа гусеничных траков используются две постоянно вращающиеся в противоположных направлениях гусеничные ленты, между которыми находится отвержденный профиль. Существенным недостатком такого механизма является то, что для профилей требуется довольно большое количество зажимных подушек специальной формы. В более удобном возвратно-поступательном устройстве в зажимной системе используется только две пары подушек, соответствующих каждому виду профиля. При этом одна подушка прижимается к другой посредством гидравлического или механического привода, а профиль находится между ними, рис. 5.



Рис. 5 Возвратно-поступательный механизм протягивания

Дополнительная термообработка

При прохождении фильеры определенного сечения, материал не успевает окончательно пройти процесс отверждения, поэтому для него применяется дополнительная термообработка т.е. при этом отверждение происходит в свободном состоянии. В результате размеры изделия не вполне соответствуют размерам формующей фильеры. Это является основным недостатком процесса пултрузии.

Изделия

В электротехнической промышленности пултрузионные установки используются, в основном, для изготовления круглых стеклопластиковых стержней электротехнического назначения диаметром от 10 до 50 мм (рис.6).

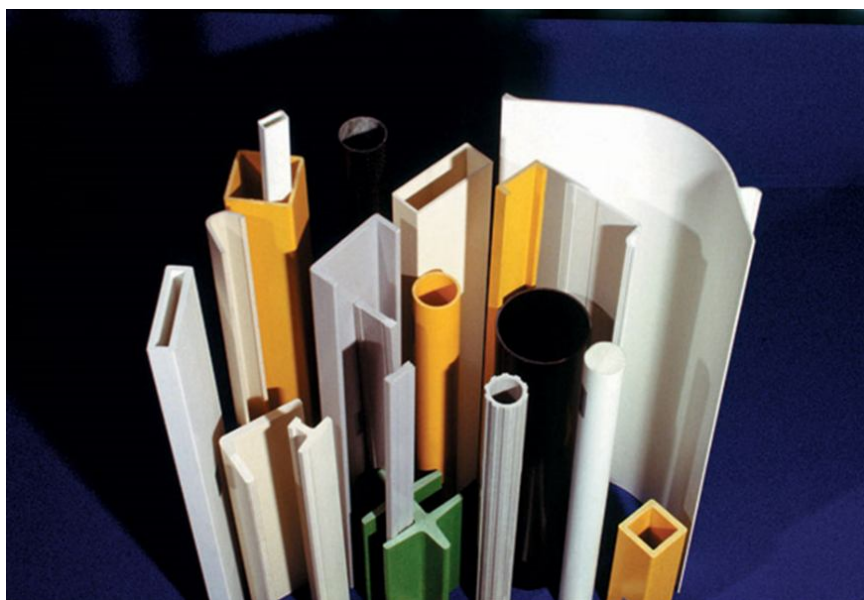


Рис. 6 Изделия, получаемые методом пултрузии

3. Свойства получаемого профиля

Пултрузия идеально подходит для производства строительных профилей различного сечения, стеклопластиковых труб, защитного короба. Получаемые таким способом стеклопластиковые изделия имеют существенные преимущества по прочности, электропроводности, теплопроводности и долговечности перед аналогами, изготовленными из традиционных материалов, таких как дерево, сталь (см. табл.1).

Таблица 1 - Свойства стеклопластиковых пултрузионных профилей

Вид	Матрица	Наполнитель	Уд.вес, г/см ³	% смола	G раст., МПа	Gсж, МПа	Гизг, МПа	E, МПа
ПСПНП	Орто-фталевая ПН-1	Стеклоровинг РБН 20-4800-4п однонаправленный	1.9	30/70	710	220	540	35000
ПСПНП КСЛ	Орто-фталевая ПН-1	Стеклоровинг РБН 20-4800-4п днао-прав-ленный с тканью НПП-210	1.9	30/70	651			35000
ПСПЭП	ЭД-20+ИНТС	Стеклоровинг РБО 24-2400-117А	2.070	30/70	1390	480	1600	51900
ПБПНП Стержень 20мм	ЭД-20	Стеклоровинг РБО 24-2400-117А	2.1	25/75	880	910	1050	50000
ПСПЭП	ЭД-20	Стеклоровинг РБО 24-2400-117А	2.073	30/70	1000	380	670	49000
ПСПЭП	ЭД-20	Стеклоровинг РБН 20-4800	2.07	30/70	1160	810	1130	43200
	УП643	Стеклоровинг РБН 24-4800	2.12	25/75			1070	42830

ПСПНП - профиль стеклопластиковый пултрузионный на основе ненасыщенной полиэфирной смолы

ПБПНП - профиль базальтопластиковый пултрузионный на основе ненасыщенной полиэфирной смолы

ПУПНП - профиль углепластиковый пултрузионный на основе ненасыщенной полиэфирной смолы

ПСПЭП - профиль стеклопластиковый пултрузионный на основе эпоксидной смолы

4. Заключение

Анализ показал, что метод пултрузии наиболее автоматизированный процесс для получения однонаправленных стержневых изделий силового назначения.

Выявлены наиболее слабые места в технологическом процессе пултрузии, это: пропитка нитей связующим, процесс полимеризации в фильтре и режимы дополнительной термообработки.

В настоящее время с появлением новых материалов и термореактивных смол становится необходимым проведение научных исследований с использованием этих материалов в технологическом процессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение конструкционных пластмасс в производстве летательных аппаратов / Под ред. А. Л. Абибова – М.: Машиностроение, 1981. – 152 с.

2. Игнатъева В. Б., Игнатъев Б. Б. Изготовление силовых элементов конструкций из композиционных материалов // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: 36. наук. пр. – Луганськ: СУДУ, 2000. – С. 214–218.

3. Волков Р. А. Исследование основных вопросов технологии изготовления профилей методом протяжки // Труды ЦНИИТС. – М.: 1987. – С. 74–78.

4. Каллистер У., Ретвич Д. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры) / Пер. с англ. под ред. Малкина А. Я. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – 896 с.

5. Лурье С. А., Дудченко А. А., Гнездилов В. А. Основы термоупругости композиционных материалов. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Беловодье, 2013. – 144 с.

7. Михайлин Ю. А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 752 с.

8. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

Поступила в редколлегию 16.12.2015 г.