

УДК 678.027.94:677

**А. П. КРАВЧЕНКО**, д-р техн. наук, проф. ВНУ ім. В. Даля, Северодонецк;  
**В. А. КОСТРУБ**, канд. техн. наук, доц. ВНУ ім. В. Даля, Северодонецк;  
**С. Н. ГАНЖА**, ВНУ ім. В. Даля, Северодонецк

### ЭНЕРГОСИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РОЛТРУЗИИ

В современных условиях ресурсосбережения, важную роль играет использование в автомобилестроении конструкций, имеющих высокую степень совершенства производства – снижение массы автомобиля, повышение прочности и экономичности. Разработка таких конструкций возможна на основе использования композиционных материалов. Получение изделий из таких материалов связано с непрерывными высокопродуктивными методами – технологии пултрузии и ролтрузии. Однако создание сложных схем армирования такими технологиями встречает ряд затруднений. Пултрузионные композитные профили обладают невысокими сдвиговыми и трансверсальными характеристиками и низкой прочностью при продольном сжатии. Для устранения указанных недостатков целесообразно вводить один или несколько слоев вспомогательной трансверсальной арматуры. Реализация вспомогательного армирования оказывается весьма затруднительной в сочетании с непрерывным процессом формования. Процесс ролтрузии является модификацией процесса пултрузии. Отличается тем, что формующий тракт представляет собой ряд пар приводных формующих роликов, изготовленных по форме получаемого композитного стержня. Важным параметром данного технологического процесса является величина усилия протягивания. В связи с этим возникает необходимость регламентирования значения усилия протягивания, которое обеспечит напряженно-деформированное состояние изделия и устранил коробление и снизит энергозатраты.

**Ключевые слова:** композитный стержень, процессы пултрузии и ролтрузии, напряженно-деформированное состояние, энергозатраты.

**Введение.** 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. Стержневые композитные профили находят применение в качестве силовых и подкрепляющих элементов корабельных, авиационных и автомобильных конструкций, причем характер их нагружения обуславливает действие нагрузки преимущественно в осевом направлении. Такого рода стержневые элементы изготавливаются, в большинстве своем, методом пултрузии, позволяющем получать длинномерные изделия с высокими скоростями изготовления.

**Состояние вопроса и постановка задачи.** 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 [1 - 4]. 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 пултрузии [5 - 8].

Процесс ролтрузии - формование роликами [9] - является модификацией процесса пултрузии и отличается тем, что формующий тракт представляет собой ряд

пар приводных формующих роликов, изготовленных по форме получаемого композитного стержня (рис.1).

Наиболее важным параметром ролтрузионного технологического процесса является величина усилия протягивания. Увеличение этой характеристики до определенного значения может привести к разрыву продольной арматуры и невозможности формования изделия. В связи с этим возникает необходимость регламентирования значения усилия протягивания. Кроме того, снижение усилия протягивания приводит к изменению напряженно-деформированного состояния изделия, что, в свою очередь, в определенной мере устраняет коробление и снижает энергозатраты.

**Содержание исследования.** Величина усилия протягивания является совокупностью усилий, вызванных сопротивлением движению формируемого изделия на отдельных этапах его изготовления.

Движение жгутов основной арматуры может быть представлено совокупностью отдельных участков, на каждом из которых появляются дополнительные составляющие усилия протягивания. Распределение усилий по длине пропиточно-формирующего тракта приведено на рис. 1.

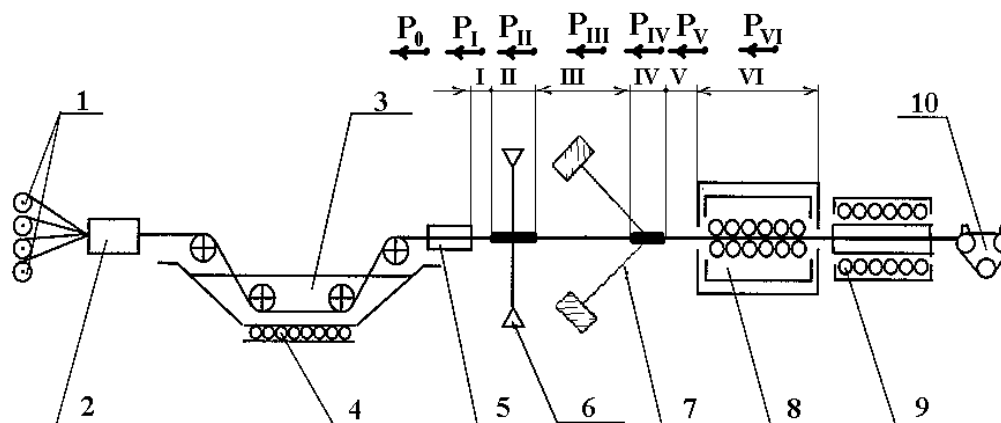


Рисунок 1 - Схема непрерывного технологического процесса формирования профиля методом "ролтрузии": 1 - шпулярник; 2 - распределительное устройство; 3 - пропиточная ванна; 4 - нагревательный элемент; 5 - отжимная фильера; 6 - обмоточный узел; 7 - оплеточный узел; 8 - формующие ролики; 9 - полимеризационная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

Поступающие с бобин шпулярника жгуты основной арматуры перед входом в пропиточную ванну натягиваются с определенным усилием с целью обеспечения прямолинейности арматуры на всех этапах формования изделия. Величина этого усилия выбирается опытным путем и составляет 5...10 Н/жгут. Поступающие в пропиточную ванну жгуты смачиваются связующим, подтормаживаются за счет дополнительных перегибов, что приводит к появлению дополнительного усилия натяжения. В результате усилие  $P_0$  на выходе из пропиточной ванны незначительно и составляет 10...15 Н/жгут.

Участки I, III, V характеризуються движением пропитанным связующим прямолинейных жгутов на поверхности оправки. Возникающие при этом усилия сопротивления определяется силами сцепления связующего и оправки. Величина этого усилия может быть определена экспериментально с учетом температуры окружающей среды, вязкости связующего и площади контакта

$$P_I = p_0 \pi d l_1, \quad (1)$$

где  $p_0$  - коэффициент прилипания, определяемый экспериментально;

$d$  - диаметр оправки;

$l_1$  - длина I участка.

Усилия  $P_{III}$  и  $P_V$  определяются аналогично.

На участке II производится формирование поперечного сечения материала изделия с помощью поперечной подмотки, осуществляемой группой нитей с определенным усилием. В результате на некоторой длине со стороны обмоточного слоя на пакет однонаправленных жгутов передается давление, приводящее к возникновению усилия  $P_{II}$ , которое может быть определено как

$$P_{II} = \pi T_0 t d f_c + p A, \quad (2)$$

где  $T_0$  - давление опрессовки, вызываемое усилием натяжения обмоточной арматуры

$$T_0 = \frac{16 \eta L_0 k_\sigma V_{пр} \varphi_H^2 [2\varphi_k - \varphi_H (1 - \varphi_k)]}{d_B^2 \varphi_k (1 - \varphi_H)}, \quad (3)$$

$\eta$  - вязкость связующего;

$d_B$  - диаметр волокон;

$V_{пр}$  - скорость протяжки;

$L_0$  - длина канала, образованного соседними волокнами, по которому фильтруется связующее;

$k_\sigma$  - коэффициент, определяемый в [10];

$\varphi_H$  и  $\varphi_k$  - начальная и конечная степени наполнения продольного слоя, соответственно.

$p = p_0 \exp \frac{\gamma \cdot q}{K T_k}$  - коэффициент прилипания

где  $p_0 = A(T_k) C_1 \exp \frac{B}{T_k K}$ ;

$B, \gamma$  - постоянные, определяемые экспериментально;

$q$  - давление в связующем;

$T_k$  - температура;

$K$  - постоянная Больцмана;

$A(T_k)$  - функция температуры;

$C_1$  - коэффициент пропорциональности;

$A$  - фактическая площадь контакта поверхности на II участке.

На участке IV осуществляется укладка слоя перекрестных нитей на поверхность материала - оплетка. Как и на участке II, в результате внешнего обжатия происходит фильтрация связующего через плетеный слой, по завершению которой, т.е. в конце этого участка усилие обжатия становится равным нулю. Наличие оплеточного слоя позволяет устранить нарушение структуры материала при прохождении через формующий тракт.

Особенностью формования на этом участке является то, что обматывающая арматура натягивается под определенным углом к оси оправки и, вследствие этого, создается дополнительное усилие сопротивления, определяемое суммой проекций усилий натяжения каждой нити на ось оправки.

Полное усилие сопротивления движению на участке IV можно представить как сумму  $P'_{IV}$  - составляющей усилия натяжения оплеточных нитей и  $P''_{IV}$  - усилия сопротивления движения за счет обжатия структуры материала.

При этом, полагая линейность изменения натяжения оплеточных нитей, получим

$$P'_{IV} = \frac{n}{2} P_{пл} \cos \alpha \sin \gamma, \quad (4)$$

где  $n$  - количество нитей оплеточной арматуры;  
 $\alpha$  и  $\gamma$  - углы укладки оплетки (рис. 2);  
 $P_{пл}$  - усилие в оплеточной нити.

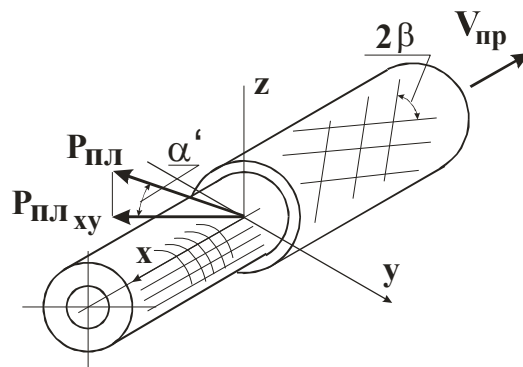


Рисунок 2 - К расчету оплеточного слоя

Учитывая, что в процессе плетения внутренняя структура материала, сформированная на предыдущем этапе, не может быть деформирована, то связующее, отфильтрованное из структуры при поперечной обмотке, должно переместиться сквозь плетеный слой. Можно, определив количество этого связующего и полагая, что фильтрация происходит только в радиальном направлении, вычислить усилие

$$P''_{IV} = \frac{T'_0 \pi d}{2} f_{мп} + p \pi d l', \quad (5)$$

где  $T'_0 = \frac{P_{пл} n}{d'_H t_{пл} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}};$  (6)

$t_{пл}$  - шаг плетения,

$f_{мп}$  - коэффициент трения;

$l'$  - длина участка, на котором действует давление  $T_0$ ;  
 $d'_H$  - диаметр этого участка.

Таким образом

$$P_{IV} = \frac{P_{np}n}{2} \cos \alpha \cos \gamma + \frac{T_0 l' \pi d_1}{2} f_{mp} + p \pi d l' . \quad (7)$$

Усилие  $P_{VI}$ , противодействующее движению в ролтрузионном тракте, возникает вследствие фильтрации излишков связующего при переформировании полуфабриката из круглого в требуемое сечение. Его величина может быть определена (рис. 3) следующим образом:

$$P_{VI} = \int_0^x T(x) \Delta S_i \sin \theta_i dx , \quad (8)$$

где  $T(x_i) = \frac{\eta L_1 V_{np}}{dx S_k K_{np}} \left\{ \frac{V_L S_K dx}{V_{np}} + \Delta W \right\} ; \quad (9)$

угол  $\theta_i$  определяется в точке с координатами  $x_i - \frac{dx}{2}$  и может быть вычислен по формуле:

$$\theta_i = \arctg \frac{x_i}{\sqrt{n^2 - x^2}} ,$$

а площадь  $\Delta S$  на участке длиной  $dx$  вычисляется следующим образом

$$\Delta S = \int_x^{x_i} \frac{2a^2 dx}{\cos \theta_i} .$$

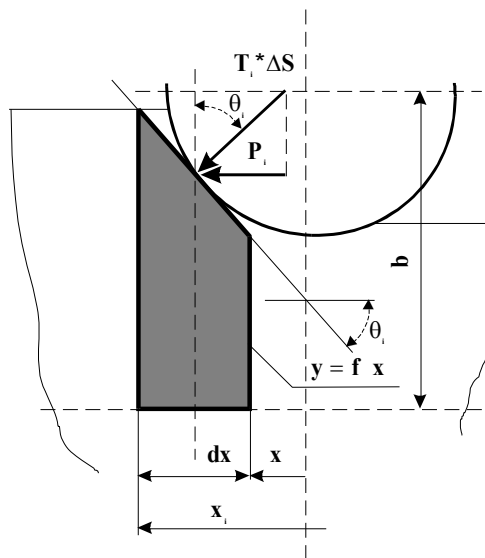


Рисунок 3 - Распределение усилий при прокатке роликами

Параметры, входящие в формулу (9), определяются

$$S_{x_i} = S(x_i) [1 - \varphi(x_i)] ,$$

где  $\varphi(x_i)$  - степень наполнения в сечении  $x_i$  ;

$S(x_i)$  - площадь сечения заданной формы.

В общем случае  $S(x_i) = \frac{S(0)}{y(0)} y(x_i)$ ,

$K_{np}$  - коэффициент проницаемости -  $K_{np} = \frac{1}{K_B} \left[ \frac{L}{L_Q} \right] \frac{U^2}{S_V^2}$ ;

$V_{np}$  - скорость протяжки;  $L_i = \frac{dx}{\sin \frac{\beta}{2}}$ ;  $\beta$  - угол оплетки (см. рис. 2).

При этом, как установлено в [11], можно считать, что вязкость связующего меняется линейно:

$$\eta(x) = Kx + \eta_0, \quad (10)$$

где  $K = 0,2 \cdot 10^3$  Па\*с/м;

$\eta_0$  - вязкость при  $x=0$ .

**Выводы.** Таким образом, задавая форму проходного сечения  $S(x)$  и используя метод итераций, можно определить величину усилия, возникающего при прохождении полуфабриката через каждую пару формирующих роликов. Просуммировав эти значения для всего формирующего тракта, можно определить усилие  $P_{VI}$ , а, следовательно, и полное усилие протяжки.

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^6 P_i .$$

Сопоставляя величину усилия протяжки с суммарной прочностью жгутов армирующего материала на разрыв, можно сделать вывод о возможности реализации процесса формования. В случае если величина  $P_{\Sigma}$  превышает суммарную прочность арматуры, необходимо увеличить степень наполнения по основной арматуре.

**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. Панфилов Б.В. Композиционные материалы: производство, применение, тенденции рынка / Б.В. Панфилов // Полимерные материалы. – 2010. - №2 – 3. –С. 40-43. 3. Коструб В.А. Анализ термокинетических параметров плетельно-пултрузионного процесса формирования композитных стержней для силовых автомобильных конструкций / В.А. Коструб, А.П. Кравченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – №30(1003). – С. 107-113. 4. Коструб В.А. Анализ напряженно-деформированного состояния при сжатии сложноармированных композитных стержневых изделий для силовых автомобильных конструкций / В.А. Коструб, А.П. Кравченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – 9(1052). – С. 127-131. 5. 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. 6. Коструб В.А. Процесс ролтрузии как метод создания сложноармированных композиционных стержневых изделий // Композиционные

материалы в промышленности (Славполиком-98): Тезисы докладов Международной конференции. Киев: АТМ Украины. - С. 87. **7. Бобрышев А.Н.** Новые модели кинетических процессов структурообразования и деструкций композитных материалов: монография / *А.Н. Бобрышев, В.Г. Шибakov, П.В. Воронов [и др.]*. - М. : Изд-во «Полеотип», 2011. - 164 с. **8. Мухаметзянова Г.Ф.** Анализ и пути совершенствования связующих SMC – компаундов для повышения качества автомобильных деталей из стеклопластиков / *Г.Ф. Мухаметзянова, И.А. Семенушкина, А.С. Назаров* // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: материалы VIII международной научно-технической конференции, 21-23 мая 2014 г., Пенза. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 354-359. **9. Коструб В.А.** Ролтрузия - прогрессивный метод изготовления профилей из КМ / *В.А. Коструб, Е.Е. Бакст* // Матер.конф. “Физико-химические и механические процессы в композиционных материалах и конструкциях”. - Москва: ВИМИ, 1996. – С. 75-76. **10. Лыков А.В.** Тепломассобмен / *А.В. Лыков*. - М.: Энергия, 1972. – 560 с. **11. Щербаков В.Т., Просветова Л.А.** / *В.Т. Щербаков, В.М. Муратов, Б.А. Жовнер [и др.]*. // Изготовление длинномерных профилей из углепластика пултрузией // Авиационная промышленность. - 1987. – №6. – С. 50-51.

**Bibliography (transliterated):** **1. Bicske SA** Tehnologiya virobnitstva litalnih aparativ iz kompozitsyynih materialiv / *SA Bicske, OV Gaydaychuk, VS Gaydaychuk* [that in.]. - K. ISDO: - 1995 - 376 p. **2. Panfilov BV** Composite materials: production, use, market trends / *BV Panfilov* Polymer materials. - 2010. – No2 - 3. p. 40-43. **3. Kostrub VA** Analysis of Thermo-kinetic parameters braiding, pultrusion process of forming composite rods for power automotive design / *VA Kostrub, AP Kravchenko* News Natsionalnogo tehničnogo universitetu "KhPI." - Kharkov .: NTU "KhPI», 2013. - No30 (1003). - p. 107-113. **4. Kostrub VA** Analysis of the stress-strain state in compression slozhnoarmirovannyh composite core products for automotive power structures / *VA Kostrub, AP Kravchenko* News Natsionalnogo tehničnogo universitetu "KhPI." - Kharkiv .: NTU "KhPI", 2014. - 9 (1052). - p. 127-131. **5. Kostrub VA** Investigation of the process composites molding method roltruzii layered composite materials-98: Conference Proceedings / *Volgograd.gos.teh.un-t, Volgograd*, 1998, S.322-323. **6. Kostrub VA** Roltruzii process for creating a composite rod articles slozhnoarmirovannyh Composite Materials in Industry (Slavpolikom-98): Abstracts of the International Conference. Kiev: Ukraine's ATM. - p. 87. **7. AN Bobryshev** New models of kinetic processes strukturoorazovaniya and destruction of composite materials: monograph / *AN Bobryshev, VG Shibakov, PV Ravens* [et al.]. - Moscow: Publishing house "Poleotip", 2011. - 164 p. **8. Mukhametzyanova GF** Analysis and ways of improving communication SMC - compounds to improve the quality of automotive parts made of fiberglass / *GF Mukhametzyanova, IA Semenushkina, AS Nazarorv* Problems of quality and operation of vehicles: Materials VIII International Scientific and Technical Conference, May 21-23, 2014, Penza. - Penza: PGUAS, 2014. - p. 354-359. **9. Kostrub VA** Roltruziya - progressive method of manufacturing profiles KM / *VA Kostrub, EE Bakst* Mater.konf. "Physico-chemical and mechanical processes in composite materials and structures." - Moscow: VIMI, 1996. - P. 75-76. **10. AV Lykov** Heat and mass transfer / *AV Lykov*. - Moscow .: Energy, 1972. - 560 p. **11. Sherbakov VT, Prosvetova LA** / *VT Shcherbakov, VM Muratov, BA Zhovner* [et al.]. Fabrication of long profiles of carbon fiber pultruded aviation industry. - 1987. – No 6. - p. 50-51.

Надійшла (received) 19.02.2015