

УДК 678.027.94:677

**В. А. КОСТРУБ**, канд. техн. наук, доц. ВНУ им. В. Даля, Луганск;  
**А. П. КРАВЧЕНКО**, д-р техн. наук, проф. ВНУ им. В. Даля

### **АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СЖАТИИ СЛОЖНОАРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ СИЛОВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Введение пространственного армирования однонаправленных композитных стержневых изделий, существенно повышает их физико-механические характеристики. При этом возникает ряд специфических проблем, связанных с реализацией процесса введения вспомогательной арматуры, с положением операций пространственного армирования в регламенте технологического процесса. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния и некоторых структурно-технологических особенностей процесса изготовления сложноармированных композитных стержней, применяемых как элементы силового набора автомобильных конструкций. Получены рекомендации по расчету структурных параметров технологического процесса.

**Ключевые слова:** композитный стержень, напряженно-деформированное состояние, схема армирования, степень наполнения, армирующее волокно.

**Введение.** В современных условиях, характеризующихся высоким уровнем развития высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, важную роль играет использование конструкций, имеющих высокую степень массового совершенства. Разработка таких конструкций для автомобилестроения возможна на основе использования современных композиционных материалов [1]. Получение изделий из таких материалов неразрывно связано с методом их изготовления. При этом, в случае изготовления стержневых длинномерных изделий из композиционных материалов в серийном и массовом производстве, целесообразно использовать непрерывные высокопродуктивные методы производства [2]. Однако создание сложных схем армирования при получении таких стержней непрерывными способами встречает ряд затруднений.

**Анализ основных достижений и литературы.** Разработанные в настоящее время методы введения дополнительной арматуры недостаточно эффективны и имеют сложное аппаратное оформление [3]. Кроме того, при формовании таких изделий ограничена скорость реализации процесса, форма и размер поперечного сечения в силу значительных усилий, возникающих при протяжке [4, 5]. В связи с этим, возникает необходимость разработки высокопроизводительных энергосберегающих процессов изготовления сложноармированных композитных стержневых изделий, а также создания научных основ для расчета их основных структурно-технологических параметров и параметров технологического оборудования для их реализации.

**Цель исследования, постановка задачи.** Разработан системный подход к проектированию структуры и расчету параметров технологического процесса изготовления сложноармированных композитных стержневых изделий в зависимости от их типоразмера и назначения [6]. Он основан на плетельно-пултрузионной технологии с формованием в роликовом тракте – ролтрузии - и позволяет получать изделия с высокой степенью массового совершенства. Как известно, введение пространственного армирования однонаправленных композитных стержневых изделий, существенно повышает их физико-механические характеристики [7]. При этом

© В. А. Коструб, А. П. Кравченко, 2014

возникает ряд специфических проблем, связанных с реализацией процесса введения вспомогательной арматуры, с положением операций пространственного армирования в регламенте технологического процесса.

**Материалы исследования.** Рассмотрим известный процесс спирального армирования. Как показано в работах [8, 9], нанесение спиральной обмотки на продольные коаксиальные слои пропитанного волокнистого материала, позволяет на 10-15% повысить сдвиговые и трансверсальные характеристики и на 20-40% прочность при сжатии. Такая схема пространственного армирования достаточно эффективна в случае, если процессы получения полуфабриката и формования разнесены во времени, т.е. получение спирально армированного полуфабриката является непрерывным, а формование профильных изделий осуществляется в прессформах. Это связано с наличием на поверхности полуфабриката спиральной обмотки, не связанной жестко с основным материалом, структура которой при прохождении формующего тракта нарушается, и она не выполняет своих функций. Поэтому, с целью обеспечения стабильности и непрерывности процесса получения сложноармированных профильных стержневых композитных изделий, а также для сохранения структуры материала, необходимо, чтобы на поверхности полуфабриката слой вспомогательной арматуры имел такую структуру, которая не нарушалась бы при прохождении формующих устройств. Такой структурой обладает плетеный слой вспомогательной арматуры. Причем, изменяя количество оплеточных нитей, угол их укладки и размер ячейки плетения, можно в широких пределах изменять параметры вспомогательного слоя.

**Результаты исследований.** Для оценки влияния оплетки на несущую способность стержневого элемента рассмотрим энергетический баланс при сжатии некруглого профиля поперечного сечения (рис. 1).

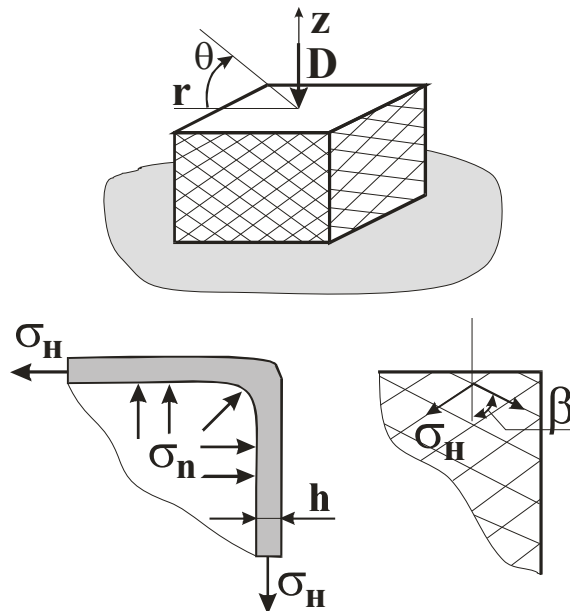


Рисунок 1 – К анализу напряженно-деформированного состояния при сжатии стержня с внешним слоем оплетки

Действие сжимающей силы  $P$  вызывает в стержне напряжение  $\sigma_z$ , направленные в направлении основной арматуры. При этом пакет продольных волокон

основной арматуры, ограниченный по периметру тонким оплеточным слоем, находится в состоянии всестороннего растяжения. На границе контакта основная арматура-оплетка возникают нормальные напряжения  $\sigma_n$ , а в нитях оплетки – растягивающие напряжения  $\sigma_n$ . Если угол ячейки оплетки –  $2\beta$ , тогда напряжения в оплеточной нити можно определить как

$$\sigma_n = -2\sigma_z \sin\beta \frac{E_n}{E} \frac{v_{r\theta} v_{rz}}{v_{zr} \left( 2 + \frac{h\Pi \sin\beta}{F} \frac{E_n}{E} \frac{v_{r\theta}^2 v_{rz}}{v_{zr}} \right)}, \quad (1)$$

где:  $E_n$ ,  $E$  – модули упругости нити и основного материала соответственно;

$h$  – толщина оплетки;

$F$ ,  $\Pi$  – площадь и периметр поперечного сечения профиля, соответственно;

$v_{r\theta}$ ,  $v_{rz}$ ,  $v_{zr}$  – коэффициенты Пуассона.

При выводе формулы (1) предполагалось, что профиль имеет застильную оплетку, т.е. расстояния между соседними нитями таковы, что не оказывают влияния на равномерность распределения напряжений в материале. Таким образом, вспомогательный слой оплеточной арматуры рассматривался условно как сплошной тонкий слой материала, обладающий анизотропией свойств в различных направлениях.

В результате принятых допущений можно определить нормальные напряжения, возникающие на границе контакта основной и вспомогательной арматуры:

$$\sigma_n = 1,8\sigma_z \frac{H}{r} \sin\beta \frac{E_n}{E} \frac{v_{r\theta} v_{rz}}{v_{zr} \left[ 2 + \frac{h\Pi \sin\beta}{F} \frac{E_n}{E} \frac{v_{r\theta}^2 v_{rz}}{v_{zr}} \right]}; \quad (2)$$

где  $r$  – радиус кривизны контура профиля.

Как видно из выражения (2), характер нормальных напряжений зависит от кривизны контура профиля. Для выпуклых участков ( $r > 0$ )  $\sigma_n$  – сжимающее напряжение, для вогнутых ( $r < 0$ )  $\sigma_n$  – отрывающее напряжение, на прямолинейных ( $r \rightarrow \infty$ )  $\sigma_n$  – стремится к нулю.

Если прочность однонаправленного профиля обозначить  $\sigma_0$ , то теоретическое значение прочности такого же профиля, подкрепленного слоем вспомогательной оплетки можно определить из выражения:

$$\sigma_{z_{\max}} = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{v_{r\theta}^2 v_{rz}}{v_{zr}} \cdot \frac{E_n}{E} \frac{h\Pi \sin\beta}{F} \right]. \quad (3)$$

Как видно из выражений (2) и (3), введение слоя вспомогательной арматуры позволяет повысить несущую способность стержней, причем для стержней закрытого профиля поперечного сечения прочность при сжатии определяется прочностью на разрыв материала вспомогательной арматуры. Для профилей открытого типа, имеющих вогнутые участки, вспомогательный слой также оказывает положительное влияние на несущую способность, однако в этом случае определяющее значение играет величина

межслоевой прочности границы раздела: основной материал – вспомогательная арматура.

Таким образом, введение слоя внешней вспомогательной оплетки повышает несущую способность профильных стержневых элементов на основе волокнистых наполнителей. Причем степень повышения, как следует из (3), прямо пропорциональна толщине вспомогательного слоя  $h$ . Однако увеличение толщины  $h$  ведет, при неизменной площади поперечного сечения  $F$ , к уменьшению доли основной арматуры, что в свою очередь снижает несущую способность стержня. Кроме того, для увеличения толщины вспомогательного слоя, необходимо либо увеличить число носителей нитей, либо использовать нити большей линейной плотности, что создает определенные технические сложности и ведет к снижению скорости протягивания.

Более технологичным и достаточно легко реализуемым технически является введение внутреннего слоя тонкой спиральной обмотки, нанесенного перед укладкой плетеного слоя. Для предотвращения смещения таких слоев, при прохождении формующих устройств, необходимо между обмоточным и оплеточным слоями укладывать коаксиальный слой основной арматуры, который обеспечивает связь между обмоткой и оплеткой. Наличие внутренней спиральной обмотки не только повышает несущую прочность стержневого элемента, но и существенно понижает его склонность к расслоению, что объясняется локализацией внутри коаксиального слоя магистральных трещин, возникающих при сжатии в направлении основного армирования.

Одной из особенностей при получении полуфабриката является то, что формообразующей поверхностью для раскладки основной арматуры является цилиндрическая оправка, с которой полуфабрикат стягивается протягивающим устройством и поступает в зону формования. То есть, полуфабрикат представляет собой полую трубку с коаксиальными слоями основной и дополнительной арматуры. Профиль сечения стержня, формируемого из такого полуфабриката, может иметь любую другую форму.

Таким образом, площади поперечных сечений полуфабриката и готового изделия различны. При этом периметры коаксиальных слоев арматуры в процессе формоизменения остаются неизменными и определяются периметром вспомогательного слоя арматуры. Естественно, что при степени наполнения полуфабриката  $\varphi'$  и готового изделия  $\varphi$  по основному материалу различны, а так как в изделии эта характеристика задается конструктивно, то в полуфабрикате она должна иметь некоторую расчетную величину. Причем, сохранение формы трубчатого полуфабриката может быть обеспечено только в том случае, если степень наполнения каждого последующего коаксиального слоя будет не больше степени наполнения предыдущего, т.е.

$$\varphi_0 \geq \varphi_1 \geq \dots \geq \varphi_n, \quad (4)$$

где  $n$  – число коаксиальных слоев.

При этом, если степень наполнения  $i$ -го слоя в изделии  $\varphi_i$ , то можно с достаточной степенью достоверности принять

$$\varphi'_i = \varphi_i \frac{\pi}{4}. \quad (5)$$

**Выводы.** Проведен анализ напряженно-деформированного состояния сжатых сложноармированных композитных стержней, на основании которого получены рекомендации по проектированию их оптимальной структуры.

**Список литературы:** 1. Применение композиционных материалов в технике // Под ред. Б. Нотон. – М.: Машиностроение. – Т. 3. – 1978. – 508 с. 2. Волков Р.А. Исследование основных вопросов технологии изготовления профилей методом протяжки / Р.А. Волков // Труды ЦНИИТС. – М., 1987. – С. 74-78. 3. Жовнер Б.А. Формование профилей прямоугольного сечения методом пултрузии / Б.А. Жовнер, В.Ф. Царев // Авиационная промышленность. – 1992. - №1. – С. 25-26. 4. Щербаков В.Т. Изготовление трубчатых конструкций методом пултрузии / В.Т. Щербаков, Б.А. Попов, Н.В. Выморков // Технология / Конструкции из композитных материалов. – 1989. – Вып.№2. – С. 47-59. 5. Жовнер В.А. Формование профилей из ПКМ методом пултрузии / В.А. Жовнер // Технология производства деталей из композитов. Тезисы докл. научно-техн. конф. – Киев: 1991. – С. 30-32. 6. Коструб В.А. Анализ термокинетических параметров плетельно-пултрузионного процесса формования композитных стержней для силовых автомобильных конструкций / В.А. Коструб, А.П. Кравченко / Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. - №42 (948). – С. 107-113. 7. Коструб В.А. Расчет параметров плетельно-пултрузионного процесса изготовления стержневых композитных изделий для автомобильных конструкций / В.А. Коструб, Е.Ю. Герасимов // Наука - образованию, производству, экономике / Материалы XI Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2013. Том 2. – С. 20-21. 8. Коструб В.А. Исследование процесса формования композитов методом ролтрузии / В.А. Коструб // Слоистые композиционные материалы-98: Сборник трудов конференции / Волгоград. гос. тех. ун-т. – Волгоград: ВГТУ, 1998. – С. 322-323. 9. Коструб В.А. Процесс ролтрузии как метод создания сложноармированных композиционных стержневых изделий / В.А. Коструб // Композиционные материалы в промышленности (Славполиком-98): Тезисы докладов Международной конференции. – Киев: АТМ Украины, 1998. – С. 87.

*Поступила в редколлегию 03.03.2014*

УДК 678.027.94:677

**Анализ напряженно-деформированного состояния при сжатии сложноармированных композитных стержневых изделий для силовых автомобильных конструкций / В. А. Коструб, А. П. Кравченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 9 (1052). – С. 127-131. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-6840.**

Проведено аналіз напружено-деформованого стану та деяких структурно-технологічних особливостей процесу виготовлення складноармованих композитних стрижнів, що використовуються як елементи силового набору автомобільних конструкцій. Отримані рекомендації щодо розрахунку структурних параметрів технологічного процесу.

**Ключові слова:** композитний стрижень, напружено-деформований стан, схема армування, ступінь наповнення, армуюче волокно.

**The analysis stress strain state conditions at compression complex armored component pivotal product for power car design / V. A. Kostrub, A. P. Kravchenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Car- and tractorbuilding. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 9 (1052). – P. 127-131. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2078-6840.**

The analysis of stressed and strained state and some of the structural, technological features of the process of manufacturing complicated reinforced composite rods are used as elements of the power set of structures. Received recommendations on estimation of structural parameters of technological process.

**Keywords:** composite rod, stress strain state, reinforcement scheme, degree of filling, armored fiber.