ЛЕБЕДЕВ Игорь Константинович, ООО «Системы армированных фильтров и трубопроводов» («САФИТ») **МОРОЗ Николай Григорьевич,** ООО «Системы армированных фильтров и трубопроводов» («САФИТ») **КАЛИННИКОВ Александр Николаевич**, Межотраслевой инжиниринговый центр «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

При проведении прочностных расчетов оболочек вращения из волокнистых композиционных материалов достаточно недостоверной является оценка поведения оболочки в зоне полюсного отверстия. Используя предложенный алгоритм, проведен анализ изменения жесткостей оболочки в зоне полюсного отверстия для различных вариантов исполнения (формирование лентой, состоящей из разного количества жгутов) и их сравнение с расчетами, полученными известными ранее способами. Данная недостоверность возникает из-за отсутствия корректных алгоритмов расчета толщины и жесткости оболочки в рассматриваемой зоне. Использование найденных зависимостей позволяет проводить оценку рационального распределения наматываемого материала при проектировании и технологической реализации оболочки из волокнистого композиционного материала и при оценке деформаций оболочки в рассматриваемой зоне полюсного отверстия, величина которых практически определяет циклическую прочность материала лейнера.

Введение. При проведении прочностных расчетов оболочек вращения из волокнистых композиционных материалов достаточно недостоверной является оценка поведения оболочки в зоне полюсного отверстия [1]. Данная недостоверность возникает из-за отсутствия корректных алгоритмов расчета толщины и жесткости оболочки в рассматриваемой зоне.

DOI

В силу особенности процесса непрерывной намотки волокнистого композитного материала толщина стенки оболочки, получаемой с помощью данного способа, изменяется вдоль ее меридиана и зависит от суммарного количества армирующего материала образующих спиралей на экваторе (толщины $h_{\rm s}$ армирующего по спиралям материала). При моделировании и реализации технологического процесса намотки, как правило, принимают нитевую модель укладки армирующего материала.

Методика исследований. На основе этой модели рассчитываются все параметры процесса намотки оболочки. В данном случае в силу условия непрерывности намотки изменение толщины h вдоль меридиана оболочки в известных работах [1-11] определяют, используя число нитей $n_{\rm s}$ проходящих через рассматриваемое сечение радиуса r и площадь сечения нити (жгута) f.

$$h = \frac{n_s f}{2\pi r \cos \varphi},\tag{1}$$

где r — текущий радиус рассматриваемого сечения оболочки; ф - угол армирования (укладки нити) в данном сечении.

На рис. 1 (см. обложку) приведен пример изменения толщины оболочки с геодезической укладкой армирующих волокон, рассчитанной с ипользованием данной зависимости.

Данное соотношение достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными в сечениях с радиусом r, находящимся в интервале $\{R > r > (r_0 + 1,1H)\}$ (рис. 2, см. обложку), где R – максимальный радиус оболочки, r_0 – радиус полюсного отверстия , H – ширина наматываемой ленты армирующего материала.

В реальном процессе реализации технологии намотки, как правило, используется ленточная модель укладки армирующего материала. На основе этой модели рассчитываются все параметры процесса намотки оболочки лентой конечной ширины Н. В известной литературе [4] при использовании приведенной выше формулы (1) в силу проявления неопределенности в точке $r = r_0$ и в силу того, что процесс намотки ведется лентой определенной ширины H, в интервале изменения радиуса r $(r_0 + 1,1H > r > r_0)$, в первом приближении толщину принимают равной толщине в сечении с радиусом (r_0 +1,1H).

УДК 669.018-419:629.735.05/.06-464

Для определения толщины в данной зоне в первом приближении построим алгоритм, базирующийся на предположении, что толщина оболочки в зоне $(r_0 + 1.1H > r > r_0)$ не изменяется по меридиану.

В данном случае, исходя из равенства объемов количества материала в нитях, находящихся в данном интервале изменения радиуса и материала сплошной оболочки (рис. 3, см. обложку), получаем следующую формулу для расчета толщины оболочки в зоне по-

$$h = \frac{n_s f \sum_{i=1}^{n_i} \sqrt{(r_0 + H)^2 - (r_0 + (i - 1/2)b_0)^2}}{n_i \pi [(r_0 + H)^2 - r_0^2]}.$$
 (2)

Из приведенной зависимости (2) следует, что толщина оболочки в зоне полюса существенно зависит от ширины армирующей ленты H (или от количества нитей (жгутов) $n_{,}$ входящих в ленту и ширины одного жгута (нити) b_0 ($H = n_i b_0$). Так, на рис. 4 (см. обложку) приведен пример расчета изменения толщины h в зоне полюса оболочки r_0 от количества жгутов с шириной одного жгута b_0 , входящих в армирующую ленту при условии сохранения общего количества армирующих нитей (жгутов) в оболочке n_{\cdot} .

Результаты исследования. Из приведенного примера видно, что, изменяя ширину ленты H (или, что одно и то же, количество жгутов ленте n_i с шириной одного жгута b_0) армирующего материала распределение толщины h в зоне полюсного отверстия можно изменять в широких пределах (см. рис. 4, см. обложку). Толщина оболочки h в зоне полюсного отверстия оболочки всегда конечна и максимальна при формировании оболочки одним жгутом (нитью) с шириной одного жгута b_0 .

Вполне очевидно, что из-за разного количества материала, проходящего по рассматриваемой зоне при укладке ленты постоянной ширины H толщина оболочки в рассматриваемой зоне не постоянна по ширине данной зоны. Для более точного учета изменения толщины оболочки в интервале $(r_0+1,1H>r>r_0)$ используем следующий подход (рис. 5, см. обложку). Рассматривая каждый жгут, начиная от полюсного отверстия, предполагается, что он вносит некоторый объем материала в зону укладки следующего жгута (так, например, жгут 1 в зоне 1 создает объем равный f^*L11 , а для зоны i данный жгут вносит дополнительный объем f^*L11 . Суммируя все объемы материала, превносимые разными j-ми жгутами армирующей ленты в зоне жгута i и считая, что в пределах зоны i-го жгута получаемая толщина h_i постоянна, получаем следующую формулу для расчета толщины h_i в рассматриваемой зоне:

$$h_{i} = \frac{n_{s} f\left(l_{ii} + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta l_{ij}\right)}{n_{i} \pi b_{0} \left[r_{0} + \left(i - \frac{1}{2}\right) b_{0}\right]},$$
 где $l_{ij} = \sqrt{\left(r_{0} + j b_{0}\right)^{2} - \left(r_{0} + \left(i - \frac{1}{2}\right) b_{0}\right)^{2}};$ (3)
$$\Delta l_{ij} = l_{ij} - l_{ij-1}$$

где h_i — постоянная толщина в пределах i-го жгута армирующей ленты.

На рис. 6 (см. обложку) приведен пример использования данной формулы (3) для расчета распределения толщины h в зоне $(r_0+1,1H>r>r_0)$ полюсного отверстия с радиусом 13 мм для оболочки с максимальным радиусом 190 мм с общим количеством жгутов $n_s=1824$ при использовании ленты состоящей из $n_i=12$ жгутов шириной $b_0=2$ мм (кривая 1), ленты, состоящей из $n_i=8$ жгутов также шириной $b_0=2$ мм (кривая 2), ленты, состоящей из $n_i=6$ жгутов также шириной $b_0=2$ мм (кривая 3) и ленты состоящей из $n_i=4$ жгутов также шириной $b_0=2$ мм (кривая 4).

Приведенный пример показывает, что толщина оболочки в зоне полюсного отверстия также существенно зависит от ширины армирующей ленты H, от количества нитей (жгутов) n_{i^*} входящих в ленту, и ширины одного жгута (нити) b_0 . Характер изменения толщины по меридиану оболочки, рассчитанной с использованием данной зависимости, полностью соответствует экспериментально определенному (рис. 7, см. обложку).

Используя аналогичный подход, как и для определения толщины h_i , можно получить соответствующие зависимости для расчета коэффициентов мембранных жесткостей в рассматриваемой зоне полюсного отверстия оболочки.

Базовыми предположениями в данном случае является то, что в данной зоне формируется структура материала, состоящая из разнотолщинных слоев материала с различными углами армирования, и число слоев, формирующих данную зону, равно числу жгутов, входящих в ленту. В данном случае для определения коэффициентов мембранной жесткости пакета в зоне полюсного отверстия оболочки получаем следующую зависимость:

$$B_{mn}^{i} = B_{mn}^{ii} + \sum_{i=1}^{i-1} B_{mn}^{ij} . {4}$$

Причем, следуя рис. 5, угол армирования для слоев с именем i равен $\varpi/2$, а для всех дополнительных

слоев, формирующих пакет материала в зоне с именем i, угол армирования определяется по формуле

$$\sin \varphi_{j} = \frac{r_{0}}{r_{0} + (j - 1/2)b_{0}},$$

а толщина данного дополнительного слоя j определяется зависимостью

$$\Delta h_j = \Delta l_{ij} \frac{nf}{\pi (r_0 + (i - 1/2)b_0)b_0 n_j}.$$

Коэффициенты B_{mn}^i при этом определяются по известным соотношениям [1]:

$$\begin{split} B_{11} &= h_i (\bar{E}_1^i \cos^4 \varphi_i + 2 \bar{E}_1^i v_{21}^i \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \\ &+ \bar{E}_2^i \sin^4 \varphi_i + G_{12}^i \sin^2 2\varphi_i); \\ B_{22} &= h_i (\bar{E}_1^i \sin^4 \varphi_i + 2 \bar{E}_1^i v_{21}^i \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \\ &+ \bar{E}_2^i \cos^4 \varphi_i + G_{12}^i \sin^2 2\varphi_i); \\ B_{12} &= B_{21} = h_i ((\bar{E}_1^i + \bar{E}_2^i) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \\ &+ \bar{E}_1^i v_{21}^i (\sin^4 \varphi_i + \cos^4 \varphi_i) - G_{12}^i \sin^2 2\varphi_i); \\ \bar{E}_2^i &= \bar{E}_2^i / (1 - v_{12}^i v_{21}^i); \\ \bar{E}_1^i &= \bar{E}_1^i / (1 - v_{12}^i v_{21}^i), \end{split}$$

где E_1 – модуль упругости; ф – угол намотки i-го волокна; E_2 – модуль упругости связующего материала; \mathbf{v}_{ii} – соответствующие коэффициенты Пуассона.

Заключение. Анализ приведенных примеров показывает на существенную разницу в распределении жесткостей в данной зоне как при намотке лентами различной ширины, так и при использовании известных методик их расчета. Различие может составлять 200-300 %. Такое различие в результатах расчетов коэффициентов жесткости B_{ij} в конечном итоге приводит и к различным результатам расчетов прочности и деформируемости оболочки в данной зоне. Кроме того, при технологической реализации процесса намотки неравномерное распределение материала по ширине рассматриваемой зоны приводит к образованию пустот, заполняемых впоследствии связующим, что также существенно сказывается на работоспособности рассматриваемого узла конструкции оболочки.

Использование приведенных зависимостей позволяет проводить оценку рационального распределения наматываемого материала при проектировании и технологической реализации оболочки из волокнистого композиционного материала и при оценке деформаций оболочки в рассматриваемой зоне полюсного отверстия, величина которых практически определяет циклическую прочность материала лейнера, используемого для создания, например, баллонов высокого давления.

Настоящая статья выполнена в рамках договора № 02.G25.31.0175 «Разработка новых импортозамещающих технологий производства металлокомпозитных емкостей и баллонов высокого давления с применением высокоточного позиционирования заготовок, микроплазменной сварки и программно-аппаратной интеграции и оптимизации параметров технологического процесса изготовления и испытаний», финансируемого Министерством образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ажогин Φ . Φ . Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. М.: Металлургия, 1974. 256 с.
- 2. *Андреевская Г.Д.* Высокопрочные ориентированные стеклопластики. М.: Наука, 1966. 371 с.
- 3. Возможность и эффективность использования отечественных металлокомпозитных баллонов высокого давления в составе бортового оборудования воздушных судов / И.К. Лебедев [и др.] // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. N° 2. С. 137–142.
- 4. Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев [и др.]. М., 1990. 512 с.
- 5. Конструкционные эпоксидные углепластики / Г.М. Гуняев [и др.] // Авиационная промышленность. 1984. № 12. С. 41–45.
- 6. Лебедев И.К., Лебедев К.Н., Никонов В.В. Технология и результаты испытаний нагруженного металлокомпозитного баллона высокого давления // Научный вестник ГосНИИ ГА. -2017. № 17. С. 90-96.
- 7. Механические свойства сталей и сплавов при не стационарном нагружении: справочник / Д.А. Гохфельд [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 408 с.
- 8. *Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М.* Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига, 1966. 260 с.

- 9. *Трощенко В.Т., Сосновский Л.А.* Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Ч. 1. Киев: Наук. думка, 1987. 347 с.
- 10. *Фудзии Т., Дзако М.* Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982. 232 с.
- 11. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1983. 296 с.

Лебедев Игорь Константинович, канд. техн. наук, OOO «Системы армированных фильтров и трубопроводов» («САФИТ»). Россия.

Мороз Николай Григорьевич, канд. техн. наук, ООО «Системы армированных фильтров и трубопроводов» («САФИТ»). Россия.

141351, Московская обл., Сергиево-Посадский р-н, д. Жучки, 2д.

Тел.: (495) 989-48-42.

Калинников Александр Николаевич, зав. лабораторией, Межотраслевой инжиниринговый центр «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». Россия.

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5. Тел.: (499) 263-63-91.

Ключевые слова: баллоны высокого давления; волокнистая оболочка; моделирование; армирующее волокно; полюсное отверстие.

TO THE ESTIMATION OF THICKNESS AND STIFFNESS OF FIBROUS SHELL IN THE ZONE OF THE POLE HOLE

Lebedev Igor Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, JSC "Reinforced Filters and Pipelines Systems" (SAFIT). Russia.

Moroz Nikolai Grygoryevich, Candidate of Technical Sciences, JSC "Reinforced Filters and Pipelines Systems" (SAFIT). Russia.

Kalinnikov Alexander Nikolayevich, Head of laboratory, Intersectoral Engineering Center "Composites of Russia", Bauman Moscow State Technical University. Russia.

Keywords: high pressure cylinders; fibrous shell; simulation; reinforcing fiber; pole hole.

When carrying out strength calculations of shells of rotation from fibrous composite materials, it is rather unreliable to assess the

behavior of the shell in the zone of the pole hole. This inaccuracy occurs due to the lack of correct algorithms for calculating the thickness and stiffness of the shell in the area under consideration. Using the proposed algorithm, the analysis of changes in the stiffness of the shell in the zone of the pole hole for different versions is carried out (the formation of the tape, consisting of a different number of bundles) and their comparison with the calculations obtained by previously known methods. The use of the found dependences makes it possible to assess the rational distribution of the wound material in the design and technological implementation of the shell of a fibrous composite material and is especially important in assessing the deformation of the shell in the considered zone of the pole hole, the value of which practically determines the cyclic strength of the material of the liner.

DOI YAK 631.3

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ И УКРЕПЛЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКА В ПОСЛЕВОЕННЫЕ ГОДЫ (1946–1950 ГГ.)

НОЖКИНА Ирина Александровна, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

ШАЛАЕВА Светлана Станиславовна, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

ВОЛКОВА Маргарита Борисовна, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

В статье на базе анализа публикаций газеты общесоюзного значения «Социалистическое земледелие» анализируется процесс восстановления технического оснащения сельскохозяйственного труда в послевоенный период.

Введение. Разработка концепции развития аграрной сферы экономики страны в условиях импортозамещения продукции сельского хозяйства предполагает наряду с использованием современных достижений науки и практики обращение к опыту прошлого. В связи с этим представляет интерес процесс восстановления сельского хозяйства в послевоенный период,

когда решать сложные вопросы отрасли приходилось только с опорой на собственные силы. О реалиях этого времени свидетельствуют различные источники, в том числе материалы периодики. Сельскохозяйственная проблематика на общесоюзном уровне отражалась в газете «Социалистическое земледелие» (орган народного комиссариата СССР), на страницах

12 2018

