ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

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)»
ЛЕБЕДЕВ Игорь Константинович, ООО «Системы армированных фильтров и трубопроводов»
МОРОЗ Николай Григорьевич, ООО «Системы армированных фильтров и трубопроводов»

В статье рассмотрены вопросы выбора композитного материала в составе металлокомпозитных баллонов высокого давления, используемых в авиационной и космической технике. Показано, что наиболее применяемый в настоящее время для этих целей стеклопластик в комбинации со стальным лейнером в условиях изготовления и эксплуатации способствует развитию малоциклового усталости и коррозионного растрескивания материалов. Показано, что повысить характеристики металлокомпозитных баллонов можно путем использования в качестве материала силовой оболочки высокопрочного и высокомодульного углепластика. Приведены результаты создания высокоэффективных сверхлегких металлокомпозитных баллонов с силовой оболочкой, армированной угольным волокном, и тонкостенным сварным лейнером из нержавеющей стали.

Введение. Одной из распространенных конструкций баллонов, изготовленных с использованием композиционных материалов, является конструкция, представляющая собой металлическую оболочку усиленную только по длине цилиндрической части армирующим материалом с углом армирования $\varphi = \pi/2$ (тип 2 по классификации DOT). Применение композиционного материала с углом армирования $\varphi = \pi/2$ позволяет получить рациональную конструкцию и существенно снизить вес такой конструкции в сравнении с цельнометаллической.

Казалось бы, конструкция баллона спроектирована и отработана в соответствии со всеми действующими нормами и стандартами. Однако, по истечении определенного периода времени происходит ее разрушение, приводящее в ряде случаев к катастрофическим последствиям.

Опыт эксплуатации баллонов с использованием в качестве армирующего наполнителя стекловолокна показывает, что большинство отказов баллонов связано с образованием структурных дефектов как в материале металлической оболочки (лейнера), так и в материале композитной оболочки, возникающих при циклическом и длительном нагружении баллона внутренним давлением.

Образование структурных дефектов в материале лейнера происходит в силу возникновения упругопластических деформаций, приводящих к зарождению и накоплению микродефектов в структуре материала и их развитию по механизму малоциклового усталости.

Характерной особенностью малоциклового разрушения является относительно слабая за-

висимость количества циклов до разрушения от номинальных напряжений, превышающих предел текучести. В таких условиях малоцикловую прочность оценивают по деформационным критериям, то есть по величине допустимой деформации для каждого цикла нагружения [2].

Методика исследований. Вследствие циклического нагружения металла в воздухе обычно в наиболее ослабленном месте возникает одна глубокая и острая трещина усталости. Развитие ее происходит в основном под влиянием концентрации напряжений и окислительного действия воздуха на свежесформированных поверхностях в вершине трещины. При аналогичных испытаниях сплава в электролитах развитие усталостной трещины происходит под влиянием электрохимического фактора, связанного со сложной электрохимической ситуацией внутри трещины. Это послужило основанием для разграничения процесса усталости металла на коррозионный и некоррозионный (в воздухе) [3, 4].

При анализе рассматриваемой конструкции в силу негерметичности стеклопластиковой оболочки кроме циклического силового нагружения баллона при его работе проявляется циклическая коррозия (циклическое коррозионное растрескивание) лейнера, которые в совокупности и определяют структурные изменения материала лейнера и живучесть баллона.

Результаты исследований. В рассматриваемой выше конструкции в явном виде реализуются указанные два вида малоциклового и коррозионной усталости материала. Представленные на рис. 1 состояния внешней и внутренней поверхностей лейнера, выполненного из материала сталь 4130 [1] (российский аналог стали 30ХМА,

30ХМ, 20ХМ), используемого практически во всех известных конструкциях баллонов такого типа, показывает, что в существующих конструкциях явно проявляются два вида отмеченных выше воздействий.

Образование структурных дефектов в материале композитной оболочки в данном случае происходит по следующему ряду причин.

Высоконаполненные однонаправленно армированные стеклопластики (базальтопластики) обладают свойством линейной упругости вплоть до того момента, когда в них появляются признаки макроразрушения [5–13]. На рис. 2 в качестве примера приведены диаграммы зависимости напряжения от деформации, полученные при испытании однонаправленных стеклопластиковых стержней.

При прогнозировании фактических значений прочности однонаправленного стеклопластика учитывают возможные колебания, вызванные несовершенством технологического процесса, которые можно учесть, если ввести поправочный коэффициент γ_t (коэффициент несовершенства технологии). Накопленный при испытаниях различных изделий из стеклопластиков опыт показывает, что для них в зависимости от условий производства значение γ_t может составлять 0,58–0,96. Это объясняется тем, что свойства полимерной матрицы (ее предельная деформация или прочность адгезионной связи с армирующими волокнами) не всегда позволяют полностью реализовать прочностной ресурс стеклянных волокон.

Так же, как и прочность всех других материалов и конструкций, прочность композитов сильно зависит от длительности воздействия нагрузки при эксплуатации. Подробно результаты исследования температурно-временной зависимости прочности и температурно-силовой зависимости долговечности стеклопластиков приведены в работах [9, 13], где показано, что при длительном действии постоянной по величине нагрузки и при температурах до 50 °С предел длительной прочности σ_t однонаправленно армированного стеклопластика не превышает $0,563 \sigma_b$.

Результаты испытаний однонаправленных

Рис. 1. Проявление коррозии в материале лайнера

образцов стеклопластика циклически изменяющейся нагрузки, представленные на рис. 3, показывают, что прочность стеклопластика также существенно зависит от циклических нагрузок.

При этом следует отметить, что выносливость (количество циклов до разрушения N) стеклопластика (базальтопластика) зависит не только от максимального значения напряжения в цикле, но и от соотношения между максимальным и минимальным значением напряжения.

В результате обработки множества экспериментальных данных получены многочисленные соотношения, позволяющие прогнозировать усталостную прочность стеклопластика $\sigma_{\text{ц}}$ на базе требуемого количества циклов нагружения, одно из которых может быть представлено в виде:

$$\sigma_{\text{ц}} = 0,9 \sigma_b \cdot N^{-0,15}.$$

Совокупность всех приведенных факторов изменения свойств стеклопластиков позволяет сделать заключение, что прочность стеклопластика на некотором промежутке времени эксплуатации баллона составляет не более 30 % от его исходной статической прочности.

Практически аналогичным образом изменяются и жесткостные характеристики стеклопластика (модуль упругости).

Таким образом, при длительной циклической эксплуатации баллонов рассматриваемой конструкции в стеклопластике возникают структурные дефекты в виде локальных разрывов стеклопластиковой оболочки баллона. Как правило,

Рис. 3. Изменение прочности стеклопластика при циклическом нагружении

Рис. 2. Диаграммы растяжения стеклопластика

данные дефекты в первую очередь проявляются на внутренней поверхности композитной оболочки, что вызвано в силу конструктивной особенности баллона спецификой распределения по толщине стенки возникающих в материале напряжений.

Кроме того, процесс образования такого рода дефектов усугубляется при введении операции автофретирования лейнера, который широко используется для минимизации веса конструкции баллона.

Суть процесса автофретирования заключается в том, что при нагружении баллона давлением автофретирования $P_{\text{и}}$ в материалах его конструкции возникают деформации, превышающие деформацию текучести материала лейнера. При снятии внутреннего давления автофретирования $P_{\text{и}}$ между лейнером и композитной оболочкой возникают контактные давления, вызывающие напряжения растяжения в материале композитной оболочки (σ композит) и сжимающие напряжения в материале лейнера (σ лейнер).

Таким образом, за счет введения операции автофретирования длительность нагружения стеклопластика существенно увеличивается (практически на весь период жизни баллона). Суммирование растягивающих напряжений в стеклопластиковой оболочке, возникающих от автофретажа и при нагружении баллона внутренним циклическим давлением, приводит к высокому уровню длительных и циклических напряжений и, как было показано выше, к падению его механических характеристик. Кроме того, в силу изменения характеристик стеклопластика при длительном и циклическом нагружении проявляется явление ползучести стеклопластика, что приводит к увеличению размаха пластических деформаций в материале лейнера при его циклическом нагружении и тем самым к снижению циклов его нагружения рабочим давлением.

Совокупность всех отмеченных выше явлений приводит к структурным изменениям как в материале лейнера, так и в стеклопластиковой оболочке и тем самым к разрушению баллонов такой конструкции.

Практически аналогичная ситуация происходит и в конструкциях баллонов, выполненных по схеме 3 (металлическая оболочка – лейнер, усиленная по всей наружной поверхности композиционным материалом) с использованием стеклопластика (базальтопластика) в качестве основного материала для композитной оболочки (рис. 4). Следует отметить, что использование в качестве материала лейнера алюминиевых сплавов не спасает, а усугубляет процесс разрушения в силу особенностей самих алюминиевых сплавов (низких пределов деформации разрушения).

Указанные выше особенности металлокомпозитных баллонов с кольцевой или сплошной

Рис. 4. Один из видов разрушения баллона, выполненного по схеме 3 классификации DOT

подмоткой из стеклопластика (базальтопластика) необходимо учитывать при проектировании и определении допустимых режимов при эксплуатации.

Повысить характеристики металлокомпозитных баллонов можно путем использования в качестве материала силовой оболочки высокопрочного и высокомодульного углепластика. В работах [14–17] приведены результаты создания высокоэффективных сверхлегких металлокомпозитных баллонов с силовой оболочкой, армированной угольным волокном. Углепластик обладает более высокими прочностными и жесткостными характеристиками [18, 19], что позволяет снизить деформацию лейнера и свести к минимуму предпосылки развития малоциклового и коррозионной усталости. Кроме того, у металлокомпозитного баллона с углепластиковой силовой оболочкой более высокие ресурсные характеристики (падение характеристик при длительных и циклических термомеханических воздействиях не превышает 25 %).

Данные о сохранении прочности при изгибе углепластика КМУ-Зл после воздействия различных факторов приведены в таблице.

Заключение. Анализируя приведенные выше соображения можно сделать следующие выводы.

1. Несовершенство технологии изготовления, условия эксплуатации, характер нагрузок, конструктивное исполнение, явления малоциклового усталости, явления коррозионного растрескивания материалов и другие параметры являются объективной реальностью образования структурных изменений в материале лейнера и в композитных оболочках баллонов.

2. Временной интервал образования структурных изменений в материале лейнера и стеклопластиковых (базальтопластиковых) оболочках баллонов (спроектированных и отработанных по действующим нормам) определяется перио-

Данные о сохранении прочности при изгибе углепластика КМУ-Зл после воздействия различных факторов, %

Показатель	%
Выдержка при 90 °С в течение 1500 ч	95
Термоциклирование от –60 до +60 °С (500 циклов)	98
Выдержка в воде при $t = 24$ °С в течение 1000 ч	100
Натурная экспозиция в условиях теплого влажного климата в течение двух лет	85
Микологическое воздействие в течение 200 ч	100
Натурная экспозиция в условиях космоса в течение двух лет	100
Знакопеременная нагрузка величиной $0,4\sigma_{\text{в}}$ ($2 \cdot 10^6$ циклов)	100
Статическая нагрузка величиной $0,4\sigma_{\text{в}}$ в течение 5000 ч	100

дом 7–10 лет и существенно зависит от используемого типа стекловолокна (базальтопластика) и проводимых технологических операций при изготовлении баллонов.

3. Проектное прогнозирование изменения физико-механических свойств стеклопластиков (базальтопластиков) и проводимые сертификационные виды испытаний не позволяет предусмотреть и учесть все возможные факторы, влияющие на работоспособность и надежность металлопластиковых (базальтопластиковых) баллонов давления.

4. Длительное использование таких конструкций баллонов (металлический лейнер + + стеклопластиковая (базальтопластиковая) оболочка) крайне рискованный шаг, который может приводить к многим катастрофическим ситуациям, что подтверждается многочисленными отчетами разбора аварийных ситуаций в ряде стран.

5. В западных странах конструкции такого рода баллонов практически выведены из эксплуатации, а при проектировании к ним обращается особое внимание со стороны инспектирующих органов.

6. Применение углепластиков для силовой оболочки металлокомпозитных баллонов высокого давления позволяет свести к минимуму указанные выше предпосылки развития процесса потери их работоспособности во время эксплуатации.

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. Андреевская Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. – М.: Наука, 1966. – 371 с.
2. Анисимов Ю.Н., Савин С.Н. Прогнозирование прочностных свойств армированных стеклотканью

композитов на основе их межфазных характеристик // Пластические массы. – 2002. – № 11. – С. 12–13.

3. Армированные пластики – современные конструкционные материалы / Э.С. Зеленский [и др.] // Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – Т. XLV. – № 2. – 2001. – С. 56–74.

4. 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. – № 2. – С. 137–142.

5. Конструкционные эпоксидные углепластики / Г.М. Гуняев [и др.] // Авиационная промышленность. – 1984. – № 12. – С. 41–45.

6. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. – М.: Металлургия, 1974. – 256 с.

7. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справочник / Д.А. Гохфельд [и др.]. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996.

8. Петров М.Г. Анализ прочности и долговечности однонаправленного стеклопластика с позиций кинетической концепции разрушения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2003. – Т. 9. – № 3. – С. 376–397.

9. Сверхлегкие металлокомпозитные баллоны высокого давления для воздушных судов гражданской авиации / К.Н. Лебедев [и др.] // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2015. – № 9. – С. 84–92.

10. Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценс К.А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. – Рига: Зинатне, 1971. – 238 с.

11. Создание высокоэффективного металлокомпозитного баллона высокого давления / А.В. Асюшкин [и др.] // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2015. – №1 (27) – С. 19–27.

12. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 1, 448 с., кн. 2, 581 с.

13. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М., 1981. – 272 с.

14. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. – Рига: Зинатне, 1966. – 260 с.

15. Троценко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. – Ч. 1. – Киев: Наук. думка, 1987.

16. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. – М., 1982. – 232 с.

17. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. – М., 1983. – 296 с.

18. Эффективность использования металлокомпозитных баллонов высокого давления для воздушных

судов / И.К. Лебедев [и др.] // Крылья Родины. Национальный авиационный журнал. – 2016. – № 1 – 2. – С. 76 – 77.

19. Report No. 0810-25584. „FAILURE ANALYSIS OF A COMPOSITE WRAP ON A COMPRESSED NATURAL GAS TANK FROM PGW #3436”. Stork Technimet, Inc., December 8, 2008.

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.

Лебедев Игорь Константинович, канд. техн. наук, ООО «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. Жулки, 2д.

Тел.: (495) 989-48-42.

Ключевые слова: баллоны высокого давления; стеклопластиковая оболочка; высокопрочный углепластик; малочисловая прочность; коррозионная усталость.

FEATURES OF SELECTING A COMPOSITE MATERIAL FOR METAL-COMPOSITE HIGH-PRESSURE BOTTLES

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

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.

Keywords: high-pressure bottles, glass-reinforced plastic shell, high-strength carbon-fiber-reinforced plastic, low-cycle strength, corrosive fatigue.

The paper considers matters of selecting a composite material as a part of metal-composite high-pressure bottles to be used in aero-space engineering. It is shown that glass-reinforced plastic, which is the most used now for these purposes, in combination with a steel liner favors the growth of low-cycle fatigue and corrosive cracking of materials under conditions of manufacturing and operating. It is shown that characteristics of metal-composite bottles can be improved by using high-strength and high-modulus carbon-fiber-reinforced plastic as a material of the load-bearing shell. The results of creating high-efficient superlight metal-composite bottles with the load-bearing carbon-reinforced plastic shell and the thin-walled welded stainless steel liner have been presented.

УДК 631.55:631.354

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВОГО ДЕЛИТЕЛЯ ПОРЦИОННОЙ ЖАТКИ

КОНСТАНТИНОВ Михаил Маерович, Оренбургский государственный аграрный университет

ГЛУШКОВ Иван Николаевич, Оренбургский государственный аграрный университет

РАХИМЖАНОВА Ильмира Агзамовна, Оренбургский государственный аграрный университет

ГЕРАСИМЕНКО Игорь Владимирович, Оренбургский государственный аграрный университет

Обоснована актуальность применения валковой порционной жатки на уборке зерновых культур, рассмотрены ее общие конструктивные особенности и суть технологического процесса. Рассмотрена сущность отвода срезанной хлебной массы от колес мобильного энергетического средства во время работы жатки, а также конструкция и технология применяемых для этого устройств. Представлены исследования по установлению оптимальных параметров шнекового делителя порционной жатки, являющегося основной составляющей устройства для отвода хлебной массы. Приведены установленные оптимальные конструктивные и режимные параметры шнекового делителя, при которых обеспечивается корректное функционирование устройства для отвода хлебной массы от колес мобильного средства.

Введение. Уборка урожая – важный и ответственный процесс в цепочке возделывания зерновых культур. Особую актуальность данный момент приобретает в условиях низкоурожайных хлебов, что на протяжении последних лет, в частности, актуально для степной зоны России (Оренбургская область, юг Челябинской области, степная часть Ставрополя, Саратовской, Самарской областей и др.) и северного Казахстана [2, 8, 11].

Работать в подобных условиях целесообразно по раздельной технологии, в целях повышения эффективности которой в Оренбургском ГАУ

была разработаны валковая порционная жатка и ее модификации [5–7].

Цель исследования – выявить и обосновать оптимальные параметры шнекового делителя устройства отвода хлебной массы от колес мобильного энергетического средства (МЭС), входящего в состав порционной жатки.

Задачи исследования: обосновать целесообразность применения порционной жатки на уборке зерновых культур и описать ее технологический процесс; охарактеризовать сущность устройств для отвода хлебной массы от колес