

УДК 539.082.74

В.Ю. Ляхно,
О.Б. Кивиренко, канд. техн. наук,
Р.В. Варнас,
А.А. Мудрый

РАЗРАБОТКА СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК ГЕЛИЕВОГО КРИОСТАТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ЭНЦЕФАЛОГРАФА

Магнитная энцефалография (МЭГ) является неинвазивным инструментом для изучения нервной деятельности головного мозга человека. Для адекватного решения задачи реконструкции источников применяют метод магнитодинамического картирования с одновременным измерением изменений во времени вектора $B(t, x, y, z)$ магнитной индукции по большому количеству каналов. Современные измерительные системы МЭГ содержат от 100 до 350 охлаждаемых до $T=4,2$ К [1] измерительных каналов сверхпроводящих квантовых интерференционных детекторов (СКВИДов) и требуют создания специальных немагнитных криостатов («Helmet-type», где дно выполнено в виде шлема) с емкостью для жидкого гелия объемом 70...80 литров. Для обеспечения эффективности измерений расстояние от теплой до холодной поверхности криостата должно составлять 18...25 мм, а собственный шум криостата $S_{\Phi}^{1/2}(\omega)$ не должен превышать $5 \cdot 10^{-15}$ Тл/Гц^{1/2} на частотах 1...10 Гц [2]. При этом скорость испарения жидкого гелия должна быть минимально возможной.

Обеспечение указанных выше требований в конструкции криостатов требует тщательного подбора специфических материалов, совершенствования технологии композитов и учета большого количества параметров при конструировании изделия. Измерение сигналов МЭГ является, как правило, частью уникальных биомедицинских исследований, использующих сложное оборудование. Повышение чувствительности детекторов, увеличение количества измерительных каналов и развитие техники МЭГ требует дальнейшего совершенствования стеклопластиковых криостатов. Подобными разработками занимаются лишь немногие мировые лидеры индустрии криогенного приборостроения. Использование стеклопластика как конструкционного материала позволяет значительно снизить собственный магнитный шум криостата, а скорость испарения жидкого гелия у лучших таких криостатов составляет 10...15 л/сутки.

Авторами был проведен комплекс работ по разработке, изготовлению и испытаниям стеклопластикового криостата для 100-канальных МЭГ систем.

1. Моделирование напряженно-деформированного состояния стеклопластиковых оболочек криостата

Конструкция криостата представляет собой две соосные цилиндрические оболочки с донными частями сложной формы, помещенные одна в одну, полость между которыми откачана на высокий вакуум и содержит тепловые радиационные экраны.

На рис. 1 показана донная часть криостата, имеющая форму шлема для минимизации расстояния от сенсоров до источника сигнала (см. [3] и стандарт EN960:2006), пунктиром показана криогенная часть шлема. Расположение матрицы градиентометрических датчиков в трех плоскостях контролируется углами α, β, γ .

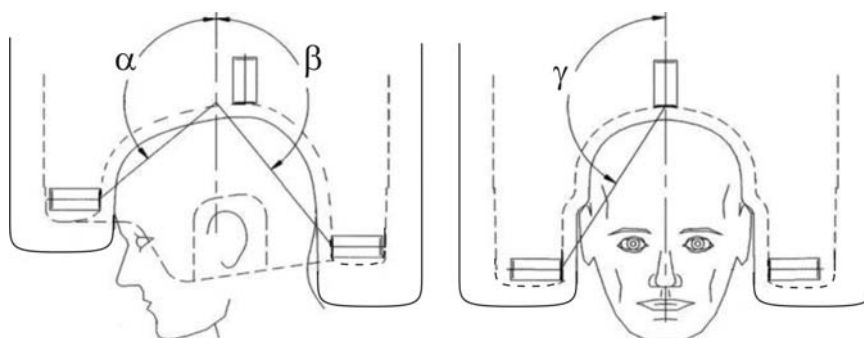


Рисунок 1 – Схема построения нижней части многоканального МЭГ криостата и расположения чувствительных элементов СКВИДов относительно головы пациента

В настоящее время для обеспечения безопасности МЭГ криостатов разработка конструкции регламентируется стандартами на проектирование ASME Boiler and Pressure Vessel Code. В соответствии с данными стандартами силовая конструкция криостата должна иметь запас прочности не менее шести. На случай потери целостности криостат должен быть оснащен предохранительными клапанами для сброса избыточного давления газообразного гелия.

Учитывая то, что днища оболочек образованы поверхностями двойной кривизны, применение классических моделей для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) становится затруднительным. В связи с этим моделирование НДС осуществлено с помощью метода конечных элементов (МКЭ) с использованием программного обеспечения системы анализа ANSYS.

Конечноэлементный объем получен путем разбиения твердотельной модели оболочек на тетрагональные элементы с переменным шагом [4].

В качестве материала был выбран стеклопластик на основе стеклоткани Э3-100 и эпоксидного связующего горячего отверждения. Физико-механические свойства ассоциированного с конечноэлементной сеткой материала определены из испытаний образцов-свидетелей.

Граничные условия на краях оболочек выбраны из условий обеспечения максимального приближения к реальным условиям закрепления.

В результате решения поставленной задачи получены картины распределения полей деформаций конечных элементов и напряжения в их узлах. На рис. 2 показано поле относительных деформаций, а на рис. 3 – эквивалентные напряжения по Мизесу в области донных частей, клевого шва и части цилиндрической оболочки криостата, где отмечены краевые эффекты.

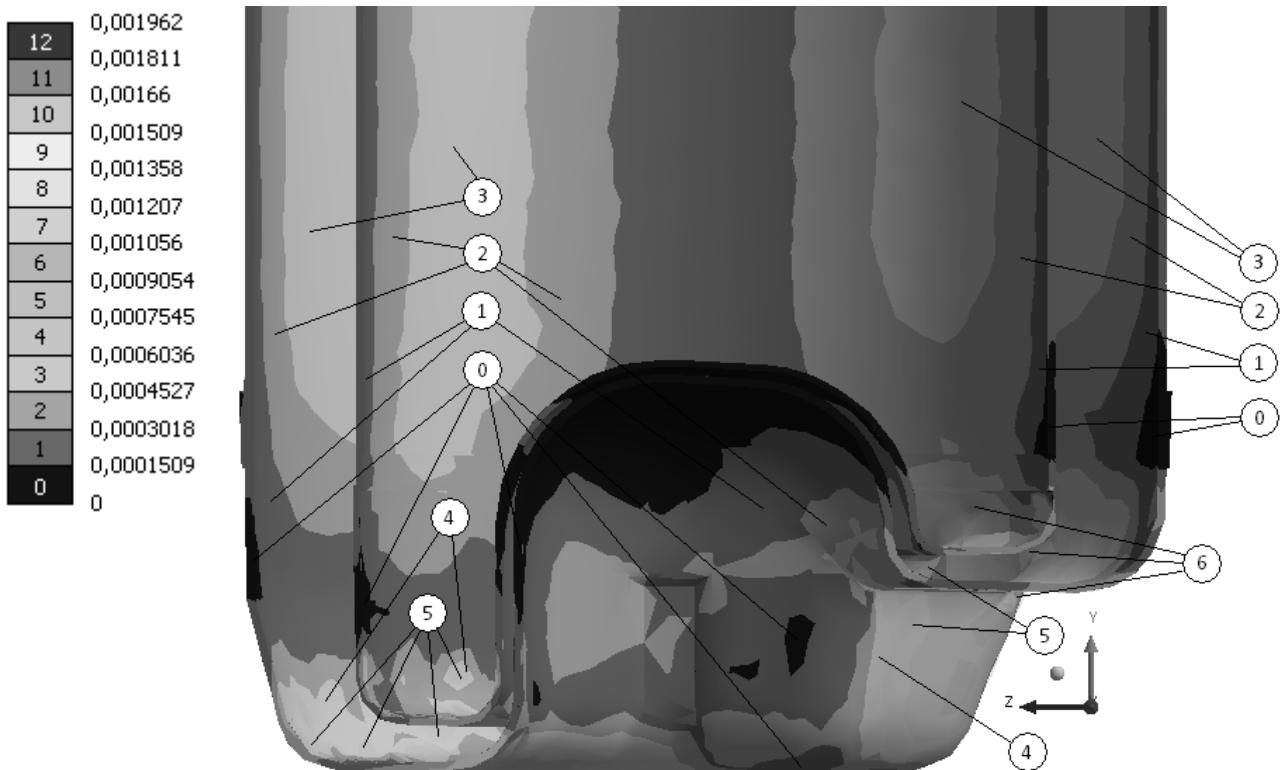


Рисунок 2 – Расчетное поле деформаций донной части 100-канального стеклопластикового «Helmet-type» криостата при разности давлений 1 атм

Как видно из рисунков, максимальные значения эквивалентных деформаций не превышают 1%, а напряжения лежат в пределах 18,5 МПа, что меньше допустимых напряжений более чем в 10 раз для выбранного материала.

Картина распределения деформаций дает также возможность оценить величину сближения внутренней и наружной поверхностей донных частей оболочек. Для наиболее податливого места она составила 1,37 мм.

Кроме определения НДС конструкции проведен расчет устойчивости цилиндрической части внешней оболочки от действия всестороннего сжатия внешним давлением.

В работе [5] приведены детальные исследования устойчивости цилиндрических оболочек и сделан вывод о том, что в случае

стеклопластиковых оболочек ($E_f / G_f \leq 20$) с точностью до 10% можно применять классическую теорию для изотропных материалов. Поэтому для оценки устойчивости внешней оболочки использована методика из работы [6] для замкнутой цилиндрической оболочки, находящейся под всесторонним сжатием внешним давлением.

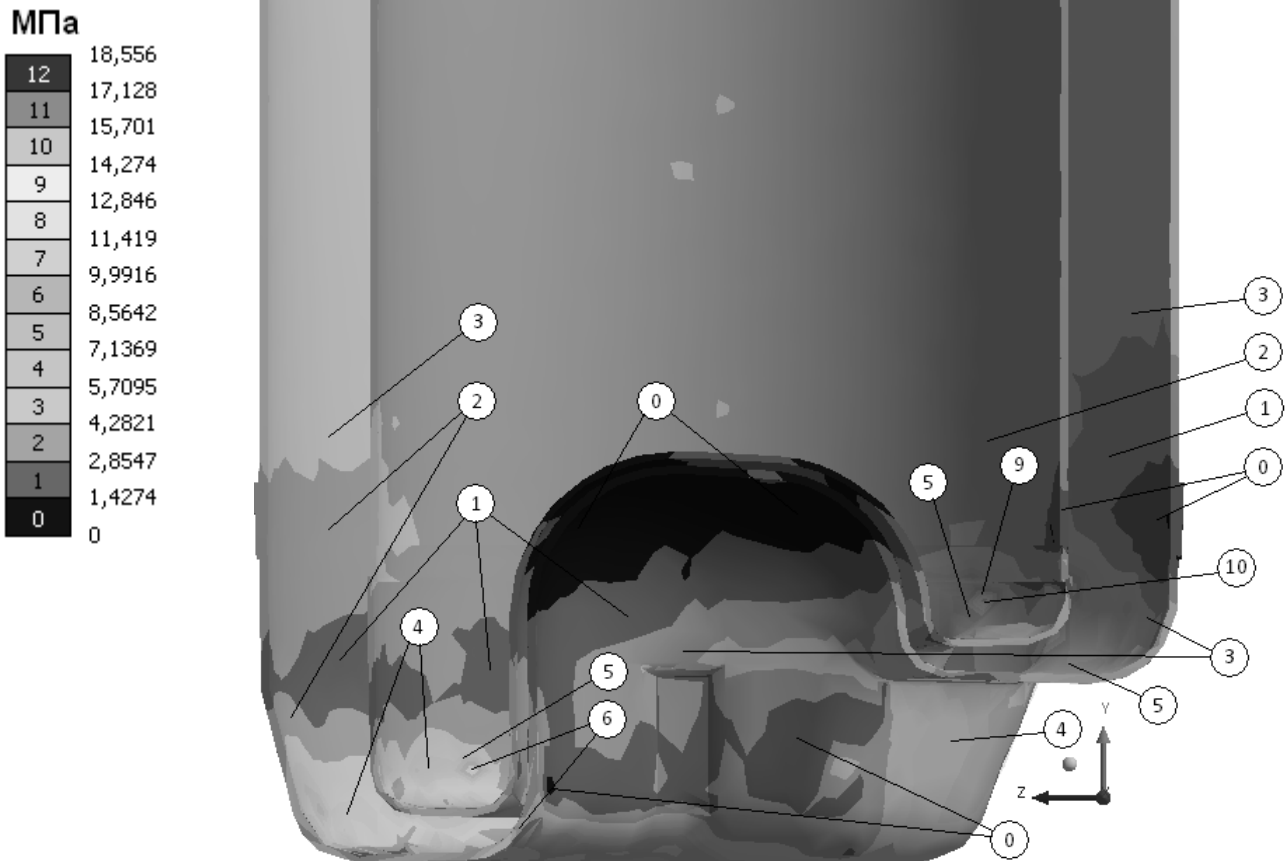


Рисунок 3 – Поле эквивалентных напряжений в материале донных частей стеклопластикового «Helmet-type» криостата при разности давлений 1 атм

Уравнение равновесия для напряженно-деформированного состояния оболочки имеет такой вид:

$$\hat{q}_e = \frac{1}{1 + \theta^2/2} \left[\frac{(1 + \theta^2)^2 \cdot \psi}{12(1 - \eta_{12}^2)} + \frac{\theta^4}{(1 + \theta^2)^2 \cdot \psi} \right], \quad (1)$$

где η_{12} – коэффициент Пуассона материала стенки оболочки.

Здесь

$$\hat{q}_e = \frac{P_{кр}}{E_1} \cdot \left(\frac{R_c}{h_c} \right)^2; \quad \theta = \frac{\pi \cdot R_c \cdot n_1}{n_2 \cdot L_c}; \quad \psi = \frac{n_2^2 \cdot h_c}{R_c}, \quad (2)$$

где $P_{кр}$ – внешнее критическое давление;

R_c, L_c, h_c – радиус, длина и толщина цилиндрической оболочки;

E_1 – модуль упругости материала оболочки.

Числа n_1 и n_2 задают количество полуволн потери устойчивости по образующей и вдоль окружности оболочки соответственно. По этим числам необходимо провести вариацию и определить их значения при минимальном критическом давлении, при котором оболочка может потерять устойчивость. При моделировании нагружения внешним давлением число полуволн по образующей принимаем равным $n_1=1$.

Для внешней оболочки с геометрическими размерами $R_c = 0,2675$ м; $L_c = 0,554$ м; $h_c = 0,006$ м и упругими характеристиками стеклопластика $E_1 = 20235$ МПа, $\eta_{12} = 0,12$ величина критического давления составляет $P_{кр} = 6,4 \cdot 10^5$ Па при $n_2 = 5$, т.е. превышает рабочее статическое атмосферное давление более чем в шесть раз.

2. Особенности конструкции и технологии изготовления криостата

Главными особенностями стеклопластикового криостата для 100-канального МЭГ являются: профилированное дно большой (~ 2 м²) площади с обратной кривизной; большой (400 мм) диаметр стеклопластиковой горловины; криогенный бак емкостью 73 литра и высокие требования к прочности конструкции и собственному шуму материала криостата. В разработанной нами конструкции криостата внутренние диаметры внешней и внутренней криогенной оболочек выбраны равными 530 и 400 мм соответственно (рис. 4) [7]. К плоскому верхнему фланцу с помощью клеевого соединения крепится внутренняя криогенная оболочка. Внешняя оболочка имеет разъемное болтовое вакуумное (резиновое уплотнение типа «паз-зуб») соединение с верхним фланцем.

Технологическое членение конструкции криостата выполнено с учетом возможностей производства и наличия заготовок для технологической оснастки. Для минимизации скачков механических напряжений на клеевых соединениях каждая донная часть имеет сопряженную поверхность с соответствующей цилиндрической оболочкой. Кроме того, в области размещения СКВИДов обе донные части должны быть выполнены в виде эквидистантных поверхностей.

Основными проблемами при изготовлении стеклопластиковых оболочек МЭГ криостата являются: получение вакуумно-плотного материала цилиндрических оболочек и профилированных донных частей, обеспечение заданных механических свойств композиционных материалов с учетом влияния многократного термоциклирования до низких температур, а также склеивание деталей криостата.

Цилиндрические оболочки изготавливались методом мокрой намотки стеклоленты шириной 76 мм на алюминиевые оправки. Для улучшения пропитки была изготовлена специальная пропиточная ванна, обеспечивающая двукратное окунание ленты.

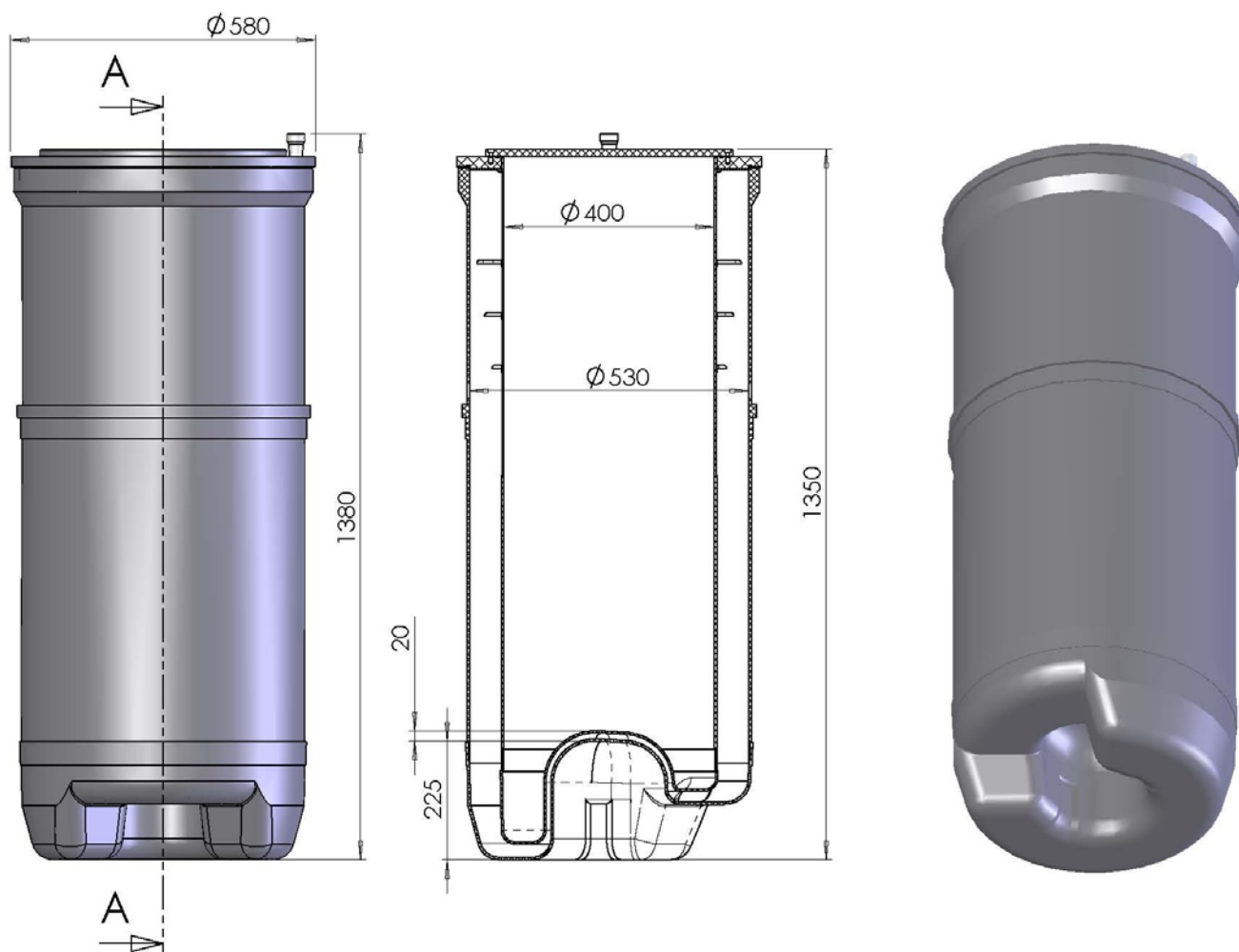


Рисунок 4 – Внешний вид созданного стеклопластикового криостата для 100-канального магнитного энцефалографа

Изготовление профилированных донных частей осуществлялось выкладкой материала на двух матрицах (рис. 5). Матрицы для выкладки выполнены сборными послойно. В качестве материала использовались листы алюминиевого сплава. Обработка формообразующих поверхностей матриц выполнена на модернизированном оборудовании с системой ЧПУ на базе персонального компьютера. Оптимизация траектории черновой обработки в САМ системе и применение чистовой обработки на повышенных подачах порядка 2500 мм/мин обеспечили минимальное время фрезерной обработки и последующей доводки формирующих поверхностей. Применение алгоритмов оптимизации скорости движения и S-образных законов разгона/торможения рабочих

органов станка позволили изготовить формообразующие поверхности матриц с высокой точностью. Погрешность изготовления формообразующей поверхности не превышает 0,05 мм.

Однородность свойств материала по толщине при изготовлении профильных оболочек донных частей достигалась с помощью усовершенствованного метода формовки. При этом пропитка армирующего материала осуществлялась в вакууме. Объемное содержание арматуры в материале профильных донных частей составляло 0,35...0,4.



Рисунок 5 – Оснастка для изготовления профильных «Helmet-type» донных частей стеклопластикового криостата и готовая стеклопластиковая заготовка дна

Для изготовления плоского верхнего фланца был использован стеклотекстолит марки СТЭФ-1 с механической обработкой поверхности и последующей дополнительной вакуумной пропиткой связующим.

Для изготовления всех элементов стеклопластикового МЭГ криостата использовано термоактивируемое связующее из композиции эпокси-диановой смолы с изо-метилтетрагидрофталевым ангидридом.

В работе [8] приводятся рецептуры этого связующего с корректирующими добавками. Для качественной полимеризации связующего требуется обеспечение заданного ступенчатого режима

нагрева и охлаждения. Для реализации технологического процесса была разработана термополимеризационная камера (рис. 6). В ней предусмотрена возможность автоматического задания режима отверждения с необходимой скоростью нагрева-охлаждения и временем выхода на заданную температуру с учетом теплоемкости оправок. При полимеризации цилиндрических деталей большого диаметра задавалось автоматическое вращение оправки с заданной скоростью.

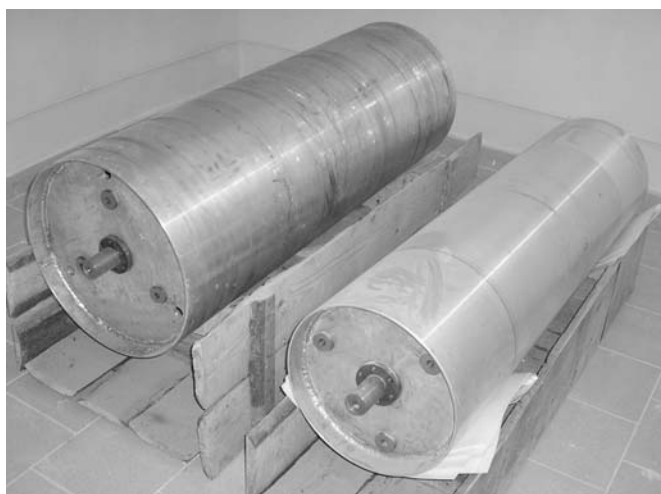
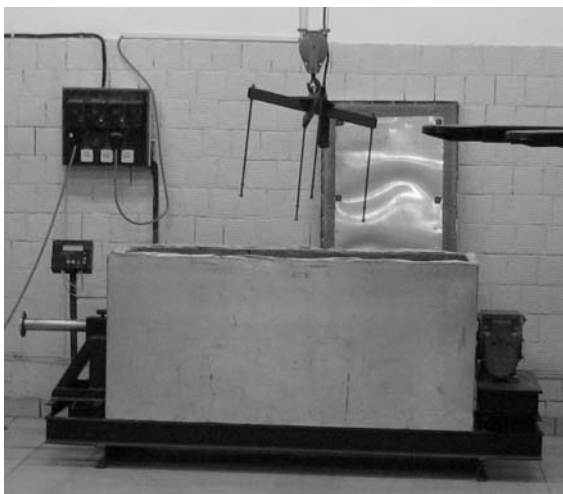


Рисунок 6 – Полимеризационная камера и алюминиевые оправки для изготовления цилиндрических стеклопластиковых оболочек.

Технология склеивания деталей включала в себя такие основные стадии: подготовку поверхности субстрата, приготовление клея, механический монтаж соединения и отверждение клея. Перед нанесением клеевой состав обезгаживается, а затем наносится на поверхности, предварительно термически обработанные по специальному режиму и пропитанные лаком без наполнителя. Полимеризация производится по ступенчатому термическому режиму: 120°C в течение одного часа и 85°C в течение двух часов. Эти меры позволяют снизить термические и усадочные напряжения до уровня, не превышающего когезионной и адгезионной прочности клеевых швов в диапазоне 4,2...400 К.

На рис. 7 показана криогенная цилиндрическая оболочка с вклеенным профильным дном 100-канального МЭГ криостата после полимеризации.

3. Механические испытания криостата

Для оценки работоспособности криостата были определены прогибы внутренней и наружной донных частей после откачки воздуха из вакуумной полости.



Рисунок 7 – Фотография внутренней цилиндрической емкости с вклеенным «Helmet-type» донной частью

Полученные результаты измеренных прогибов показали, что сближение внутренней и наружной поверхностей донных частей оболочек для наиболее податливого места составила 1,5 мм, что хорошо согласуется с расчетными данными. Таким образом, можно утверждать, что расчетные минимальные значения толщин доньшка в области расположения СКВИДов, которые составили 4 мм для холодной оболочки и 5 мм для теплой, обеспечивают запас прочности не менее шести. Остальные элементы конструкции стеклопластиковых профильных форм предусматривают еще большие запасы прочности.

Для цилиндрических оболочек наиболее опасным случаем нагружения является сжатие наружным давлением, при котором может произойти потеря устойчивости. В таких условиях работает наружная емкость криостата.

Для определения величины напряжений в материале оболочки при нагружении наружным давлением был проведен эксперимент с образцом внутренней емкости толщиной 3 мм.

Учитывая то, что технология изготовления внешней и внутренней емкостей идентичны, результаты испытаний можно использовать для оценки несущей способности наружной емкости. Проведение самого эксперимента при этом существенно упрощается: внутренняя оболочка на этапе сборки с вклеенным профильным дном герметизируется фланцем с помощью резинового уплотнения и из полученного объема откачивается воздух. Таким образом, оболочка подвергается всестороннему сжатию атмосферным давлением, а разность давлений определяется по показаниям образцового вакуумметра.

Испытания проводились при таких размерах емкости: $R_c = 0,201$ м; $L_c = 1,275$ м; $h_c = 0,003$ м. Разрушение оболочки произошло при разности наружного и внутреннего давлений $P = 0,85 \cdot 10^5$ Па, что с погрешностью до 10% соответствует расчетному значению минимального критического давления $P_{кр} = 0,79 \cdot 10^5$ Па. На рис. 8 хорошо видна потеря устойчивости внутренней оболочки с тремя участками нарушения формы, равномерно распределенными по окружности цилиндра.



Рисунок 8 – Внутренняя стеклопластиковая оболочка МЭГ криостата после проведения испытаний на устойчивость при нагружении внешним давлением

Выводы

Проведен комплекс работ по разработке конструкции, отработке технологии изготовления и испытаниям готового изделия стеклопластикового криостата для 100-канальных МЭГ систем.

Анализ конструкции и проведенные испытания подтверждают, что данное изделие обеспечивает функциональность при запасе прочности конструкции выше шести.

Данный комплекс работ позволит проводить дальнейшие работы по совершенствованию стеклопластикового криостата и обеспечить рабочие характеристики криостата (собственный магнитный шум, тепловое совершенство, ресурс работы и т.д.) на уровне лучших образцов ведущих мировых производителей стеклопластиковых криостатов.

Список использованных источников

1. Elekta Neuromag [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.elekta.com/healthcare_international_elekta_neuromag.php. - 15.05.2011 г.
2. Оптимизация параметров стеклопластикового криостата для биомагнитных исследований [Текст] / В.Ю. Ляхно, А.С. Гарбуз, Л.В. Гнездилова и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 5. – С. 150 – 155.
3. Wesley E Woodson Human Factors Design Handbook / Wesley E. Woodson, Barry Tillman, Peggy Tillman. – New York: McGraw-Hill, 1992. – 846 p.
4. Конюхов, А.В. Основы анализа конструкций в ANSYS [Текст] / А.В. Конюхов. – Казань : КГУ, 2001. – 102 с.
5. Механика композитных материалов и элементов конструкций: в 3-х т. – Т.2. Механика элементов конструкций [Текст] / А.Н. Гузь, Я.М. Григоренко, И.Ю. Бабич и др. – К.: Наук. думка, 1983. – 464 с.
6. Вольмир, А. С. Гибкие пластинки и оболочки [Текст] / А.С. Вольмир. – М.: Изд-во технико-теор. литературы, 1956. – 419 с.
7. Ляхно, В.Ю. Гелиевый криостат для 100-канального магнитного энцефалографа [Текст] / В.Ю. Ляхно, В.И. Шнырков // Матер. щорічного наук.-техн. школи-семінару «Біологічна і медична інформатика та кібернетика», ФМШ Жукін, 2010. – С. 95 – 96.
8. Связующие для стеклопластиков [Текст] / И.В. Григорович, Э.И. Мелиховская, Н.В. Корольков и др. – М.: Химия, 1975. – 160 с.

Поступила в редакцию 01.06.2011.

*Рецензент: канд. техн. наук А.В. Кондратьев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*