

# 02, июнь 2018

УДК 678

## Особенности технологического процесса намотки углепластикового корпуса реактивной гранаты

*Иванов М.К., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции»*

*Научный руководитель: Татарников О.В., д.т.н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции»  
[ovtatarnikov@mail.ru](mailto:ovtatarnikov@mail.ru)*

Аннотация: В работе рассматриваются особенности технологии изготовления углепластикового корпуса реактивной гранаты методом «мокрой» намотки. Отражены методы разрушающего и неразрушающего контроля качества изделия, среди которых: исследование микроструктуры материала, томография, ультразвуковое исследование.

Ключевые слова: намотка (winding), углепластик (carbon epoxy), корпус снаряда (shell), оправка (winding mandrel), контроль качества (quality control).

### Введение

В настоящее время традиционным материалом для изготовления корпусов гранат является легированная сталь, обладающая необходимыми прочностными характеристиками, например, 30ХГСА, 40Х. Недостатком такой конструкции является высокая плотность материала корпуса ( $7800 \text{ кг/м}^3$ ), которая приводит к увеличению веса изделия и снижению его тактико-технических характеристик.

В качестве альтернативного материала для корпуса гранаты предлагается использование углепластика. Углепластик характеризуется высокими удельными механическими характеристиками, превышающими характеристики сталей. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики углепластика КМУ-4э/0,1-2м производства компании ВИАМ и стали 30ХГСА.

*Таблица 1*

Сравнение механических характеристик углепластика КМУ-4э/0,1-2м и стали 30ХГСА

Материал	Удельная прочность, км	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Углепластик КМУ-4э/0,1-2м	$66 \cdot 10^3$	1480
Сталь 30ХГСА	$18 \cdot 10^3$	7850

Корпус гранаты должен выдерживать давление в диапазоне от 60 до 100 МПа (в зависимости от режима термостатирования РГ) и температуры в диапазоне 1800-2000 °С в течение 10-15 мс. Он представляет собой цилиндрическую тонкостенную углепластиковую трубу с закладным элементом, разделяющим зоны размещения боевой части (БЧ) и ракетного двигателя (РД).

Для определения конструктивных параметров корпуса гранаты: толщины стенки и углов армирования были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния корпуса при помощи конечно-элементного программного комплекса Femap [1]. Результаты расчета напряженного состояния корпуса при действии внутреннего давления приведены на рис. 1.

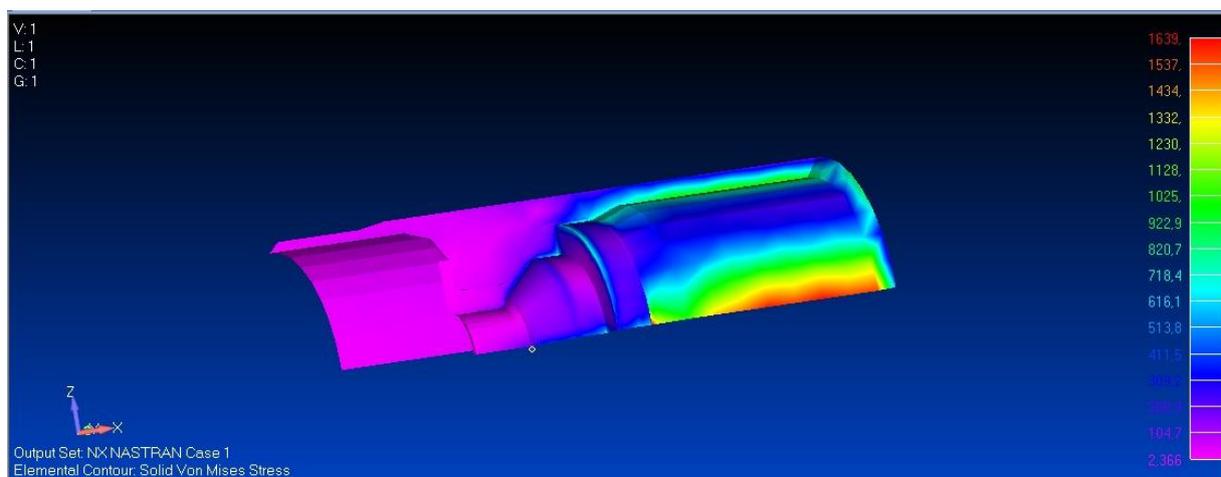


Рис. 1. Напряженное состояние корпуса РГ

## 1. Выбор материалов

Деталь изготавливается методом «мокрой» намотки [2]. В качестве армирующего наполнителя было выбрано волокно компании Umatex марки UMT-45-12K-EP. Данный выбор основан на оптимальном соотношении цена-качество. Характеристики волокна представлены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Физико-механические свойства волокна UMT-45-12K-EP

Прочность на растяжение, ГПа	4,5
Модуль упругости, ГПа	260
Относительное удлинение, %	1,7
Линейная плотность, Текс	780
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,78
Содержание углерода, %	>95

В качестве связующего рассматривалось несколько видов материалов. Среди них: Этал-50, Т-31, Т-20-60, L+EPH161, KRF 1035. Сравнительная характеристика этих материалов представлена в таблице 3.

Таблица 3

Сравнительная характеристика эпоксидных связующих

Связующее	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Относительное удлинение, %	Предел прочности при изгибе, МПа	Температура стеклования, °С	Вязкость при температуре 60 °С, МПа·с
Этал-50	72	2,5	5,8	122	130	160
Т-31	73	2,7	5,4	125	152	190
Т-20-60	80	3,2	6,2	155	87	230
L+EPH161	70	2,2	9,5	130	80	210
KRF1035	75	3,5	4,5	138	110	210

Наиболее существенным параметром при выборе связующего является его вязкость. В таблице приведена вязкость материалов при 60 °С, поскольку такая температура устанавливается в ванночке со связующим, расположенной на намоточном станке.

Основным недостатком связующих Т-20-60 и L+EPH161 является низкая температура стеклования. При намотке изделия с использованием данного связующего наблюдается его частичная полимеризация на оправке в течение процесса намотки. Это приводит к образованию большого числа пор и расслоений и, как результат, к снижению прочности изделия.

Связующее KRF 1035 содержит винилэфирную смолу с бисфенолом А и содержит летучие и легковоспламеняющиеся мономеры, например, стирол, температура вспышки для которого составляет всего 32 °С. Транспортировка и использование данного связующего должно происходить в хорошо проветриваемом огнестойком помещении. Помещение цеха, в котором производится намотка, не удовлетворяет данным требованиям, что запрещает его использование в целях безопасности.

Связующее Т-31 и Этал-50 имеют незначительные различия в механических характеристиках и не имеют вышеперечисленных недостатков. Однако, стоимость связующего Этал-50 гораздо ниже, что обусловило его выбор в качестве матричного материала. Физико-механические свойства связующего Этал-50 представлены в таблице 4 [4].

## Физико-механические свойства связующего Этал-50

Условная вязкость по вискозиметру типа ВЗ-4 с диаметром сопла $4 \pm 0,15$ мм при температуре $20^{\circ}\text{C}$ , сек	100-500
Продолжительность высыхания в тонком слое при температуре $125 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , сек	<10
Продолжительность высыхания в толстом слое при температуре $125 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , мин	<10
Твердость НВ при температуре $100^{\circ}\text{C}$ , кг/мм	5 – 8
Теплостойкость по Мартенсу, $^{\circ}\text{C}$	130
Цементирующая способность, Н	400
Жизнеспособность при комнатной температуре, ч	>4
Соотношение смола-отвердитель в весовых частях	1000:950

## 2. Особенности намотки при пониженной температуре (до $10^{\circ}\text{C}$ )

Намоточный станок представляет собой устройство с числовым программным управлением, состоящее из шпулярика, системы роликов, гребёнки и раскладчика [1]. Станок обеспечивает вращательное движение оправки и перемещение каретки по двум координатам – вдоль оси оправки и перпендикулярно оси оправки.

В зимнее время в помещении цеха устанавливается температура порядка  $8-10^{\circ}\text{C}$  и относительная влажность  $\sim 70\%$ .

При такой температуре связующее имеет крайне высокую вязкость, что затрудняет его эксплуатацию и ухудшает пропитку волокна при намотке. Это ведет к образованию большого числа пор в толщине наматываемого изделия, что приводит к резкому падению его прочности. Поэтому намотку рекомендуется проводить при комнатной температуре и низкой относительной влажности. Данная особенность обуславливает установку дополнительных обогревательных элементов в зоне намотки.

Большинство производственных помещений на территории Российской Федерации не имеют возможности сохранения постоянной температуры и влажности воздуха в помещении в любое время года. Поэтому, целесообразно выделить в помещении цеха зону для работы с композиционными материалами.

Для этого предлагается ограничить зону намотки стальным сварным каркасом, обтянутым армированной пленкой. Внутри располагаются нагревательные элементы (тепловые пушки и инфракрасные нагреватели), а также приборы для контроля условий намотки, например, психометрический гигрометр.

При высокой относительной влажности воздуха, углеродное волокно впитывает в себя некоторое количество водяных паров. При полимеризации заготовки при повышенной температуре, вода испаряется из волокна и остается в толщине изделия в виде пор. Для минимизации содержания водяных паров в волокне, на станок (перед началом намоточного тракта) предлагается установить выпариватель. Он представляет из себя короб из нержавеющей стали с галогенной лампой мощностью в 500 Вт. Важно, чтобы материал корпуса выпаривателя имел высокую отражательную способность для минимизации рассеивания светового потока. Таким образом, перед попаданием на намоточный тракт, нить проходит через короб выпаривателя, дополнительно высушивая волокно. Об эффективности данного прибора позволяет судить наличие водяного пара, идущего от прогретого волокна.

### **3. Основные этапы технологического процесса изготовления корпуса РГ**

За 1 час до начала намотки необходимо включить инфракрасные нагревательные элементы, расположенные над станком, и тепловую пушку для обогрева валиков намоточного тракта.

За время, затрачиваемое на нагрев области вокруг станка, необходимо собрать оправку с закладным элементом. Далее оправка устанавливается во вращающиеся центры. Индикатором часового типа измеряется радиальное биение оправки в сборе с закладным элементом. Изменяя положение закладного элемента с помощью киянки, требуется выставить радиальное биение не больше 0,1 мм. Затем оправка помещается в печь полимеризации для нагрева до температуры  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  (температура нагрева оправки должна быть равна температуре подаваемого связующего). Это позволяет уменьшить перепад температуры между пропитанной нитью и поверхностью оправки, что позволит сохранить вязкость связующего и производить намотку деталей сложной формы.

Даже при комнатной температуре связующее Этал-50 имеет достаточно высокую вязкость, что сильно ухудшает качество пропитки, и, как следствие, качество готового изделия. Поэтому, компоненты связующего предварительно нагревают до температуры  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ , и затем замешивают маленькими порциями в пропорциях, указанных в табл. 4. Компоненты связующего поддерживаются подогретыми в течение всего процесса намотки.

Оправка с закладным элементом с выставленным в пределах допуска биением, устанавливается на намоточный станок и тщательно смазывается антиадгезивом ПЕНТА-100 [6] для облегчения съема намотанного изделия с оправки. Нить протягивается от шпулярика к оправке в соответствии со схемой, приведенной на боковой поверхности станка, и оборачивается несколько раз вокруг оправки для закрепления нити. На станке запускается программа намотки.

В течение всего процесса намотки изделия оператор обязан присутствовать и следить за укладкой нити на оправку, а также за натяжением нити.

В зависимости от требований к наматываемому изделию, намотку можно вести одной или несколькими нитями. Среднее натяжение нити в среднем должно составлять 10% от предела прочности волокна. Важно отметить, что намотка несколькими нитями позволяет значительно ускорить процесс, однако качество готового изделия будет ниже, чем при намотке одной нитью.

В процессе намотки не допускается:

1. Сползание нити вблизи точки закрепления на оправке. В данном случае необходимо приостановить выполнение программы и вручную поправить нить. Если это невозможно, необходимо остановить выполнение программы, срезать намотанную нить и заново запустить процесс намотки.
2. Сползание нити в районе впадины закладного элемента. Исправление данной проблемы отражено в п.1.
3. Сползание нити относительно оси оправки. В данном случае визуально видно наличие зазоров между витками нити. При обнаружении данной проблемы необходимо срезать намотанную нить и заново запустить процесс намотки.
4. Обрыв нити. В данном случае необходимо приостановить выполнение программы, протянуть оборванную нить, обрезать кончик нити. Обернуть нить вокруг оправки и продолжить выполнение программы.
5. Заклинивание ролика в ванночке со связующим. В данном случае необходимо вручную повернуть ролик в ванночке.
6. Падение натяжения нити. В данном случае необходимо отрегулировать натяжение, изменяя положение роликов. Допускается изменять натяжение без приостановки программы намотки.

После завершения выполнения программы намотки необходимо отрезать нить и закрепить конец нити на оправке. Далее измеряются диаметры заготовки в произвольной точке на левой и правой полуоправках. Измерения проводятся штангенциркулем, предварительно обмотав место измерения фторопластовой лентой для сохранения чистоты измерительного прибора. После измерения фторопластовая лента удаляется с изделия.

В случае несоответствия измеренных диаметров с минимально допустимыми, запускается отдельный цикл программы, обеспечивающий намотку 3-х радиальных проходов. По завершении повторно измеряется диаметр изделия.

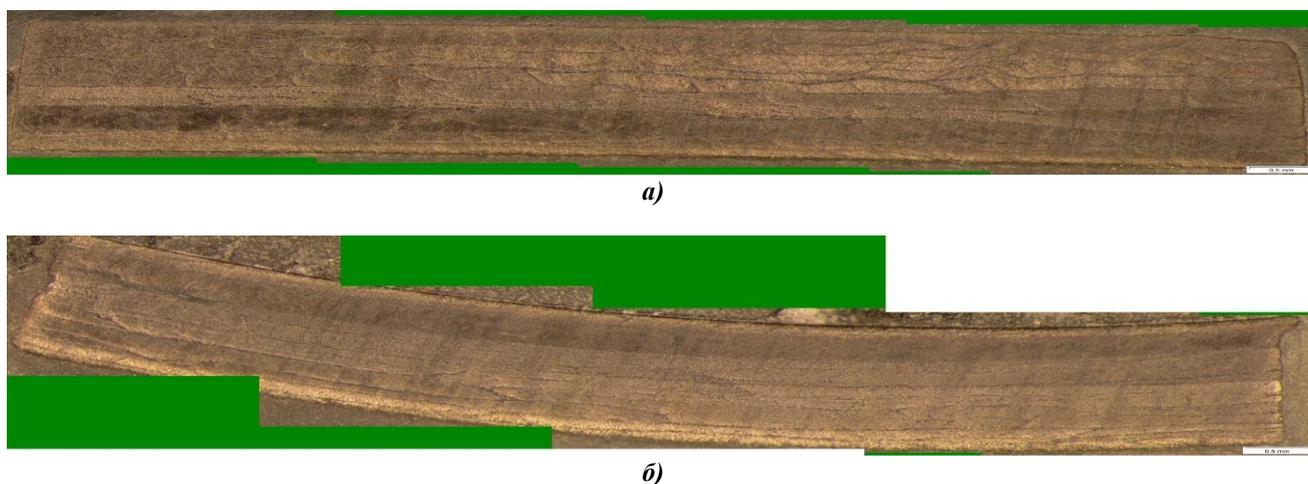
Перед процессом полимеризации связующего изделие туго обматывается 2-мя слоями фторопластовой ленты, поверх которой наматывается 2 слоя поливинилхлоридной термоусадочной пленки [7]. Слой фторопластовой ленты не позволяет термоусадочной пленке прилипнуть к поверхности неотвержденного изделия, что позволяет легко снять ее после полимеризации.

Полимеризация заготовки проводится в печи полимеризации при температуре 145°C в течение 2 часов. Температура и время выдержки определяется материалом связующего и указана в паспорте материала. По истечении указанного времени, заготовка извлекается из печи, и подвешивается на крюк в зоне намоточного станка, где поддерживается комнатная температура. С заготовки снимаются термоусадочная и фторопластовые пленки и изделие охлаждается до температуры 20±5°C.

Заготовка вместе с оправкой устанавливаются на токарный станок ЧПУ в центрах. Управляющая программа точения обеспечивает все размеры корпуса в пределах допуска. Для точения углепластика применяется твердосплавный резец из сплава ВК8.

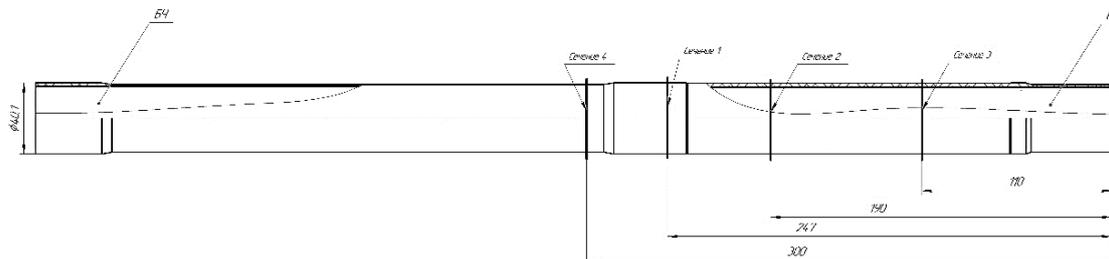
#### 4. Контроль качества готовых изделий

По окончании механической обработки из жертвенной части изделия отрезаются 2 кольца в соответствии со схемой намотки для проведения разрушающего контроля (макротемплеты). Первое кольцо, шириной 10 мм, предназначено для вырезания из него образцов и подготовке шлифов для изучения микроструктуры изделия. Микроструктура одного из изготовленных корпусов представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Микроструктура стенки корпуса:  
*a)* микроструктура поперек волокон; *б)* микроструктура вдоль волокон

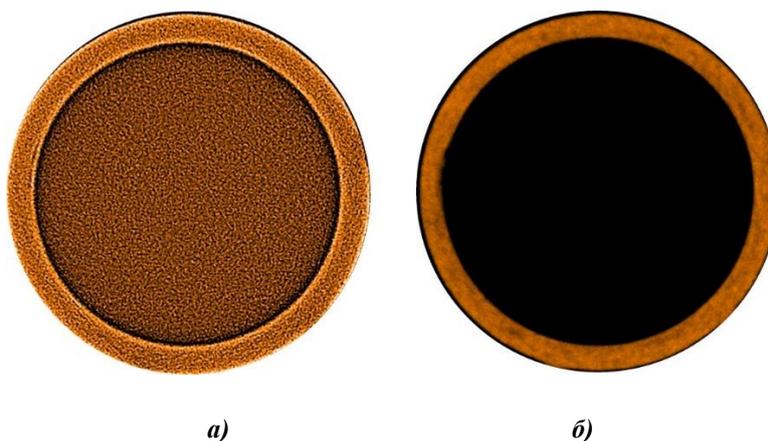
В качестве альтернативных методов неразрушающего контроля были рассмотрены томографический и ультразвуковой методы. Оба вида исследований проводились в наиболее ответственных сечениях изделия, расположение которых показано на рис.3.



*Приоритет сканирования сечений:*  
 1 приоритет – Сечение 1;  
 2 приоритет – Сечение 2;  
 3 приоритет – Сечение 3;  
 4 приоритет – Сечение 4.

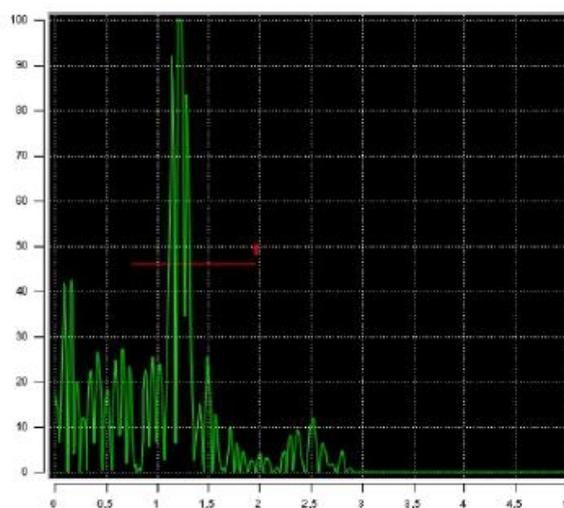
**Рис. 3.** Схема расположения сечений для проведения неразрушающего контроля

Результаты томографии одного из корпусов представлены на рис. 4.



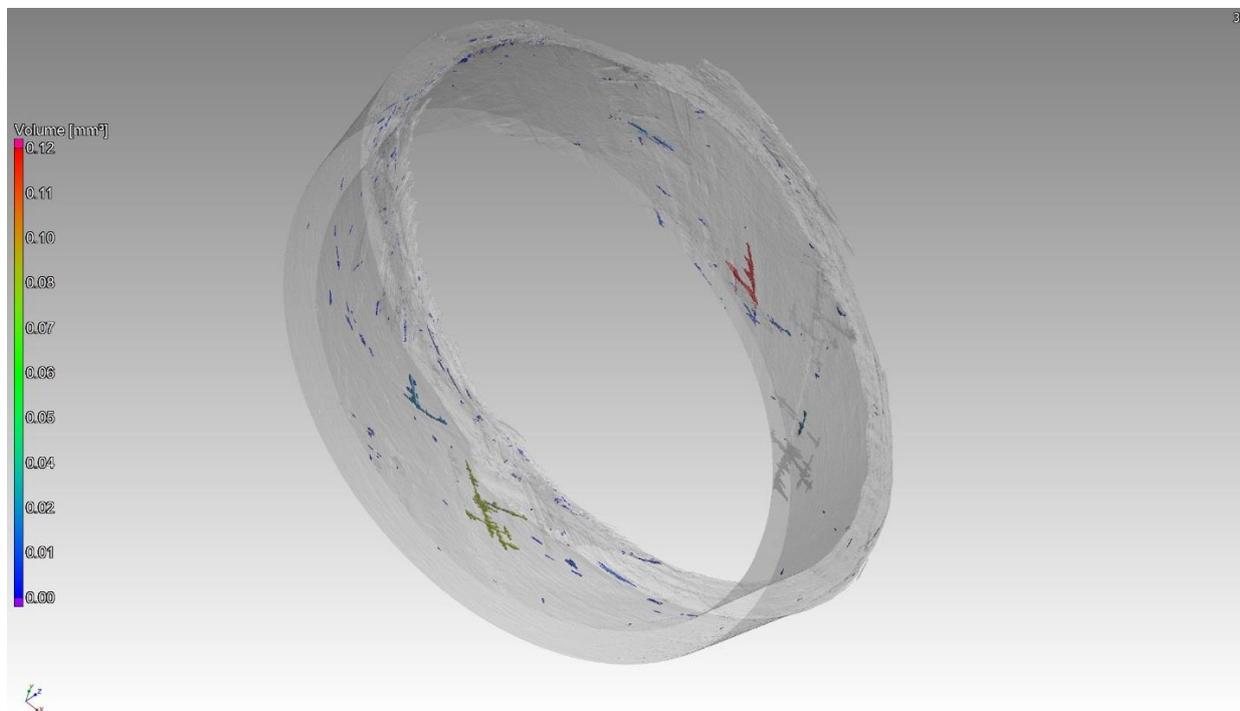
**Рис. 4.** Томография корпуса в сечении 1:  
 а) съемка при высоких частотах; б) съемка при низких частотах

Результаты ультразвукового исследования представлены на рис.5.



**Рис. 5.** Ультразвуковое исследование корпуса в сечении 1

Томографические исследования являются в высокой степени информативными поскольку они дают возможность получения объемного изображения изделия или его части, в которой отражены все дефекты структуры материала (см. рис. 6). Однако использование на практике этого метода контроля качества требует высоких временных затрат, является трудоемким и дорогостоящим.



**Рис. 6.** Объемная модель, полученная методом томографии

Ультразвуковое исследование не позволяет судить о площади дефектов структуры материала, а показывает лишь глубину, на которой они находятся. Создание объемной модели, аналогичной той, которая представлена на рис. 6, не представляется возможным.

Исходя из вышесказанного, наиболее рациональным методом контроля качества является микроструктурный анализ макротемплетов, вырезанных из жертвенной части корпуса изделия.

Для выработки критериев отбраковки изделий были проведены огневые испытания. По результатам этих испытаний было установлено, что критическими дефектами структуры материала являются поры и расслоения, возникающие во внутренних слоях наматываемого изделия с характерной длиной более 0,2 мм.

## **Заключение**

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. На основе численных расчетов показана целесообразность применения углепластика в качестве материала корпуса РГ.

2. Осуществлен выбор армирующего наполнителя и связующего.
3. Предложен вариант намотки корпуса в условиях пониженных температур.
4. Приведены результаты разрушающего и неразрушающего контроля качества изделия, изготовленного по разработанной технологии.

### **Список литературы**

- [1]. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran / С.П. Рычков. М.: ДМК Пресс. 2013. 784 с.
- [2]. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учеб. для вузов. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998. 516 с.
- [3]. Компания Umatex. Режим доступа: <http://umatex.com/> (дата обращения 25.01.2018).
- [4]. Компания ЭПИТАЛ. Режим доступа: <http://www.epital.ru/> (дата обращения 25.01.2018).
- [5]. ТУ 2257-082-40245042-2004 Отверждаемые смазки серии ПЕНТА-100.
- [6]. ГОСТ 25951 Пленка полиэтиленовая термоусадочная. Технические условия. М.: Стандартиформ. 2017. Введ. 01.01.1985.