

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

**Методические указания к выполнению курсового проекта**  
**«Проектирование гибко-жестких печатных плат в Altium Designer»**

**По курсу**  
**«Проектирование печатных плат»**

Москва, Зеленоград

2026

## **Оглавление**

Оглавление .....	2
Общая информация .....	3
Определение компоновки проекта .....	4
Определение стека .....	5
Определение гибких и жестких зон .....	9
Стандартный режим определения стека и зон .....	20
Особенности подготовки правил разводки топологии .....	22
Особенности разводки топологии .....	27
Добавление механических элементов крепежа.....	30
Особенности выпуска комплекта конструкторской документации .....	33
Литература .....	40

## **Общая информация**

В данном указании описано как с помощью Altium Designer спроектировать гибко-жесткую печатную плату (Rigid-Flex). Гибко-жесткая печатная плата состоит из нескольких участков с различным стеком, что позволяет выделить жесткие (Rigid) и гибкие (Flex) зоны.

Гибко-жесткую печатную плату может быть полезно применять в случаях, когда изделие имеет сложную объемную структуру, а разбиение на несколько печатных узлов с добавлением межсоединений необоснованно усложняет изделие с одновременным снижением его надежности. Гибкие части в этом случае выступают в роли шлейфов между участками, обладают достаточной прочностью, а общий объем изделия получается меньше.

Другое частое применение гибко-жестких печатных плат – размещение выносных компонентов (часто датчиков или элементов управления) на гибких частях, размещение компонентов на некоторой сложной по форме поверхности или использование гибких шлейфов как FPC-разъемов.

В документации на Altium Designer выделен отдельный раздел по проектированию гибко-жестких печатных плат [8].

При проектировании использовались рекомендации ООО «Резонит» [12, 13] по технологическим нормам и конструкции печатной платы.

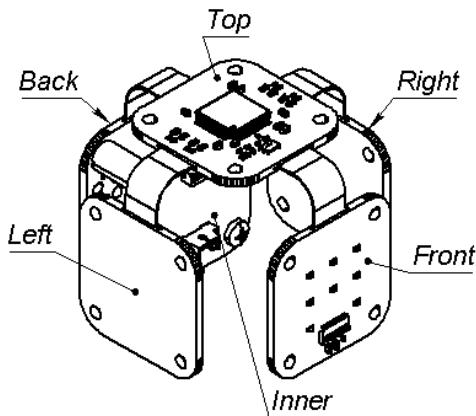
Составление электрической схемы для гибко-жесткой платы ничем не отличается от составления схемы для обычной платы на жестком основании. За исключением рекомендации группировать в схеме компоненты не только логическими блоками, но и по тем жестким зонам, где эти компоненты будут располагаться.

В текущем методическом указании приведены особенности построения проекта с гибко-жесткой печатной платой при работе с топологией и выпуска конструкторской документации.

Последняя версия данного методического указания вместе с остальными по предмету «Проектирование печатных плат» находится на [github](#) в отдельном репозитории автора [6].

## Определение компоновки проекта

Решено спроектировать небольшое автономное цифровое устройство, центральным мозгом которого является микроконтроллер STMicroelectronics STM32F103RBT6 [14]. Компоновка выбрана в виде шести одинаковых граней кубика, причем нижняя грань завернута внутрь и называется внутренней (Inner). На передней грани расположен разъем для подключения TFT-экрана (в проект печатной платы не входит) через FPC-разъем Molex 503480-1000 [15] и модуль подсветки на контроллере Texas Instruments TPS61160DRV [16], питающий восемь светодиодов Vishay VLMW1300 [17]. На боковых гранях расположены по четыре контактные части под мембранные кнопки диаметра 8 мм. Микроконтроллер расположен на верхней грани. На задней грани располагается вертикальный USB-C разъем Molex 217182-0001 [18] для подачи управления и зарядки, а также две служебные кнопки и контактные точки для шлейф-зонда Tag-Connect TC2030-CTX-NL-STDC14 [19], совместимого с программатором STMicroelectronics STLINK-V3 [20]. На внутренней грани расположены контроллер зарядки и питания Analog Devices LTC4067EDE [21] и трехпиновый разъем Molex 53398-4003 [22] для подключения LiPol-аккумулятора с контролем нагрева. Сам LiPol-аккумулятор располагается в получающемся внутреннем объеме кубика и в проект печатной платы не входит. Предлагаемая компоновка показана ниже.

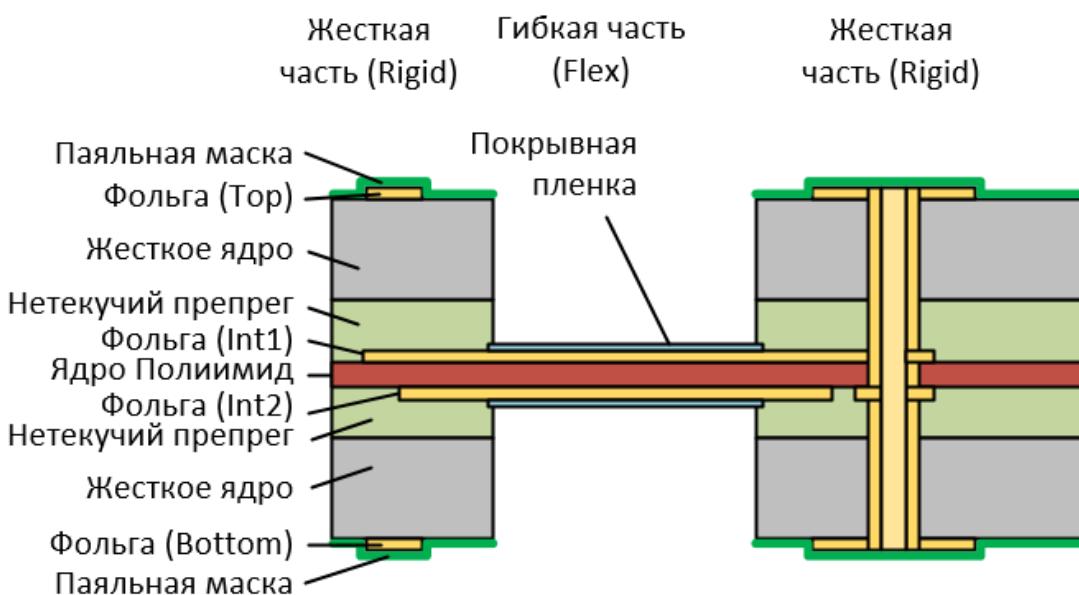


При проектировании гибко-жестких плат необходимо как можно раньше определиться с компоновкой печатной платы, расположением основных компонентов и геометрией гибких и жестких зон. Геометрию гибких и жестких зон необходимо выбирать исходя из того, что проектирование печатной платы в CAD-системах идет в развертке.

## Определение стека

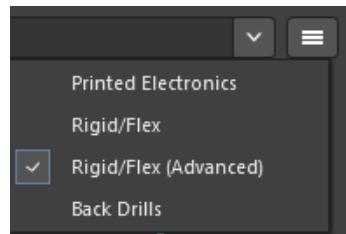
Проектируемое устройство довольно простое, поэтому воспользуемся минимальным по сложности стеком гибко-жесткой платы, где жесткая часть четырехслойная, а гибкая – двухслойная [13].

Общий вид стека показан на рисунке ниже. Несмотря на то, что технология позволяет изготавливать гибко-жесткие печатные платы с несимметричным стеком, гораздо технологичнее будет использовать симметричный стек. Также гораздо технологично выходит, если жесткие части одинаковы на всей печатной плате.



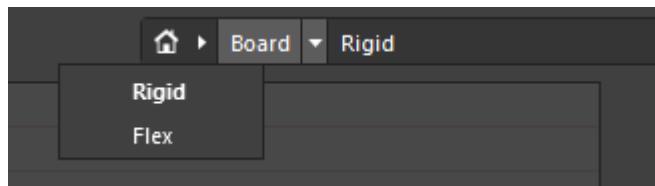
Полиимидная пленка выступает в качестве центрального ядра и находится во всех частях печатной платы. Соответственно, слои металлизации Int1 и Int2, накатанные вокруг полиимидного ядра, будут доступны по всей плате. Жесткая часть получается как бы наращенной поверх гибкого ядра через дополнительные препреги. Поэтому слои металлизации Top и Bottom доступны для разводки только в жестких частях.

В Altium Designer в последних версиях поддерживается два режима работы с гибко-жесткими платами. Включаются они в редакторе стека по кнопке . В текущем разделе описаны приемы работы в режиме Rigid/Flex (Advanced). Приемы работы в режиме Rigid/Flex описаны в отдельном разделе.

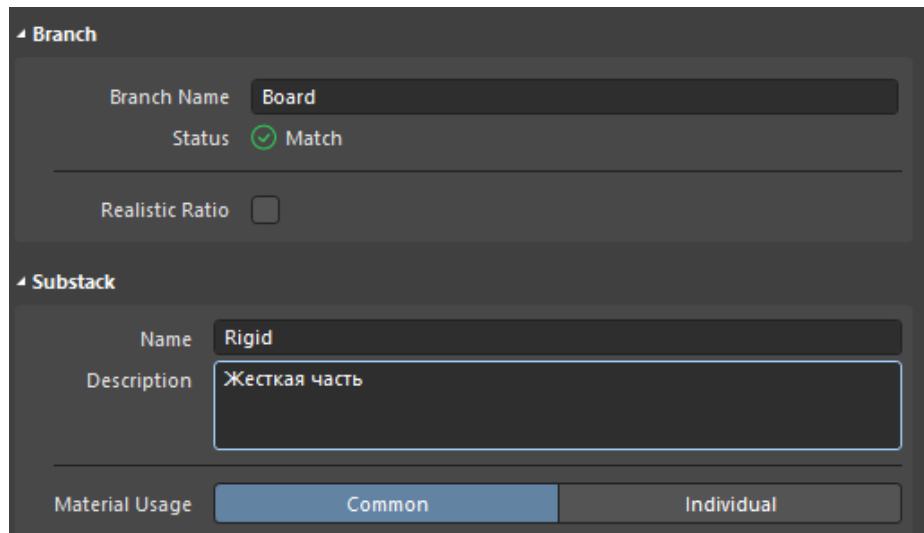


В режиме Rigid/Flex (Advanced) появляется возможность задать ветки и субстеки и их соединение друг с другом. Затем определенные субстеки необходимо присвоить выделенным областям (Board Region) в печатной плате. Также в этом режиме гораздо удобнее задавать линии сгиба (Bending Lines).

По кнопке **+ Add** создаются ветки (Branch) и субстеки (Substack). Множественные ветки в текущем проекте не нужны, поэтому будем добавлять субстеки к основной ветви Board. Определим два субстека: Rigid для жесткой части, Flex для гибкой. Полная схема созданных ветвей и субстеков показывается в выпадающем списке.



При выборе субстека на уровне основной ветви, можно его переименовать и дать описание, как показано ниже для жесткой части.



Отредактируем стек жесткой части. По ДЛКМ переходим в него. Исходя из рекомендаций ООО «Резонит» [12] определим его в следующем виде.

		Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df	Note
		Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03	
		Top Surface Fini...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm			
1	Top Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm				
	Dielectric 1	FR4_HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016		
	Dielectric 6	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017		
	Dielectric 7	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017		
	Adhesive 1	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02		
2	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm				
	Dielectric 4	AP8545R	Core		0.1mm	3.4	0.002		
3	Int (PWR)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm				
	Adhesive 2	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02		
	Dielectric 3	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017		
	Dielectric 5	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017		
	Dielectric 2	FR4_HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016		
4	Bottom Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm				
	Bottom Surface...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm				
	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03		
	Board Layer Sta...		Overlay						

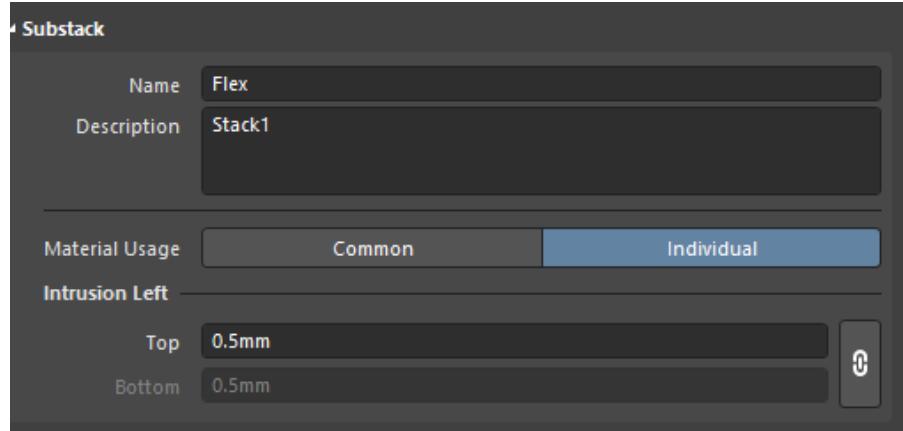
Центральное ядро – полиимидная пленка толщиной 0,1 мм с толщиной фольги 18 мкм DuPont AP 8545R [23]. Поверх центрального ядра с обоих сторон нанесем адгезивную пленку толщиной 25 мкм DuPont Pyralux LF0100 [24]. Далее по два слоя препрена FR-4 Tg170 толщиной по 69 мкм. В качестве жестких внешних ядер возьмем FR-4 Tg170 толщиной 0,51 мм с фольгой 35 мкм [25], при этом фольгу оставим только для внешнего слоя. Окончательно нанесем финишное покрытие ENIG (для гибко-жестких плат не рекомендовано использовать финишное покрытие оправлением припоеем HASL) и паяльную маску.

В жесткой части в данном стеке доступны только сквозные отверстия.

		Name	Type	Thickness	#	Thru 1:4	
		Top Overlay	Overlay				
		Top Solder	Solder Mask	0.0254mm			
		Top Surface Fini...	Surface Finish	0.004mm			
1	Top Layer	Signal	0.035mm		1		
	Dielectric 1	Core	0.51mm				
	Dielectric 2	Prepreg	0.069mm				
	Dielectric 8	Prepreg	0.069mm				
	Dielectric 6	Adhesive	0.025mm				
2	Int1 (GND)	Signal	0.018mm		2		
	Dielectric 3	Core	0.1mm				
3	Int2 (PVRSIG)	Signal	0.018mm		3		
	Dielectric 7	Adhesive	0.025mm				
	Dielectric 9	Prepreg	0.069mm				
	Dielectric 4	Prepreg	0.069mm				
	Dielectric 5	Core	0.51mm				
4	Bottom Layer	Signal	0.035mm		4		
	Bottom Surface...	Surface Finish	0.004mm				
	Bottom Solder	Solder Mask	0.0254mm				
	Bottom Overlay	Overlay					

После возвращаемся на корневой уровень и субстеку Flex переключаем режим материалов в Individual (т.к. его слои не будут полностью совпадать с

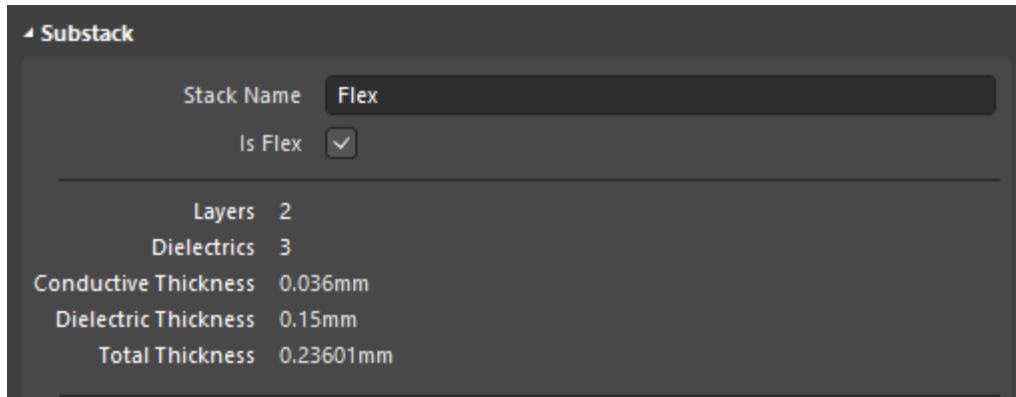
жестким стеком) и также укажем ввод в пределы жесткого стека некоторых элементов гибкой части на 0,5 мм (Intrusion) [12].



В гибком субстеке удалим все слои до адгезивной пленки. Затем с обоих сторон нанесем покровную пленку (Coverlay) DuPont Pyralux LF0110 толщиной 25 мкм.

Board > Flex									
#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df	Notes	
	Stack1 Top Cov...	FC-001	Coverlay		0.025mm	4	0.005		
	Adhesive 1	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02		
1	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm				
	Dielectric 4	AP8545R	Core		0.1mm	3.4	0.002		
2	Int (PWR)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm				
	Adhesive 2	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02		
	Stack1 Bottom...	FC-001	Coverlay		0.025mm	4	0.005		

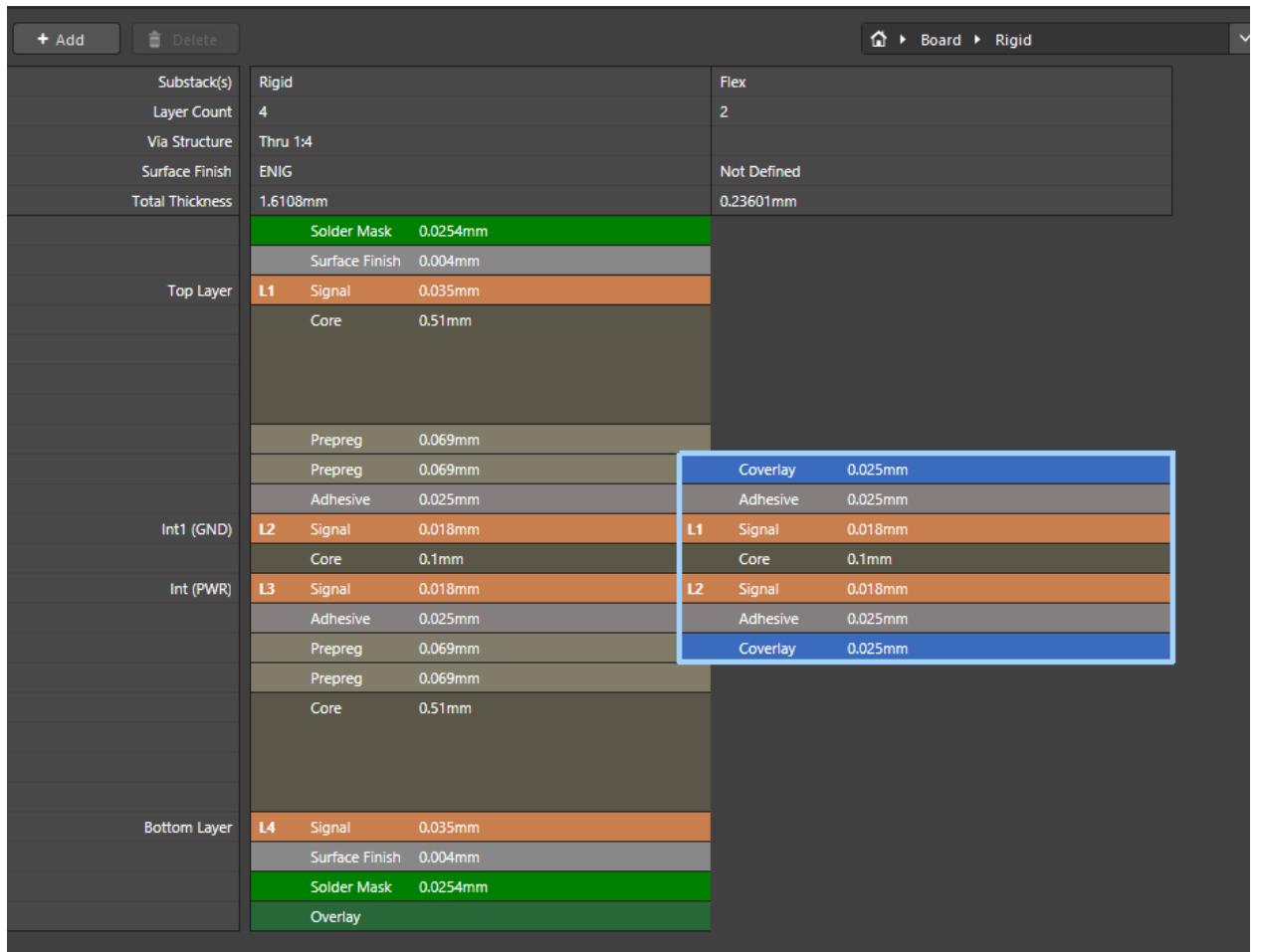
Также этому субстеку необходимо включить галку Is Flex.



Также надо учесть, что для гибко-жестких плат переходные отверстия в гибкой части доступны только по предварительному согласованию с производителем, в базовой версии стека они недоступны. Т.к. в текущем проекте гибкая часть выступает в роли шлейфов между жесткими зонами без установки на нее компонентов, то переходные отверстия в гибкой части не нужны.

#	Name	Type	Thickness
	Flex Top Coverlay	Coverlay	0.025mm
	Dielectric 6	Adhesive	0.025mm
1	Int1 (GND)	Signal	0.018mm
	Dielectric 3	Core	0.1mm
2	Int2 (PWRnSIG)	Signal	0.018mm
	Dielectric 7	Adhesive	0.025mm
	Flex Bottom Cov...	Coverlay	0.025mm

В итоговом режиме, на верхнем уровне структура стека должна выглядеть приблизительно как показано ниже.

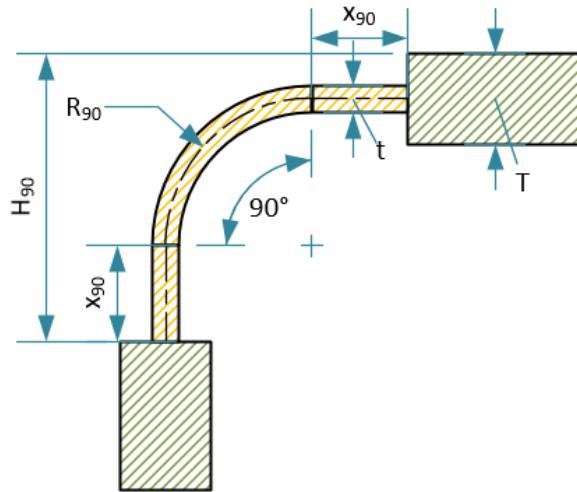


Для дальнейших расчетов отсюда понадобятся толщины жесткой части  $T = 1,61$  мм и гибкой части  $t = 0,23$  мм.

### Определение гибких и жестких зон

После того, как определен стек и выбраны самые высокие компоненты, можно переходить к расчету и определению гибких и жестких зон. В проекте решено жесткие части выполнить в виде скругленных квадратов 30x30 мм. Зоны поворотов гибких частей на 90° углов решено построить так, чтобы

поверхности плат создавали прямой угол со сдвигом  $H_{90} = 10$  мм, как показано ниже. Соответственно, можно посчитать, как будет выглядеть геометрия гибких участков для поворотов на  $90^\circ$  (показан вид сбоку для сгиба).



Можно вывести следующие соотношения размеров

$$H = x_{90} + R_{90} + T / 2, \text{ где}$$

$R_{90}$  - радиус сгиба областей под  $90^\circ$  (определяется по центральной линии),

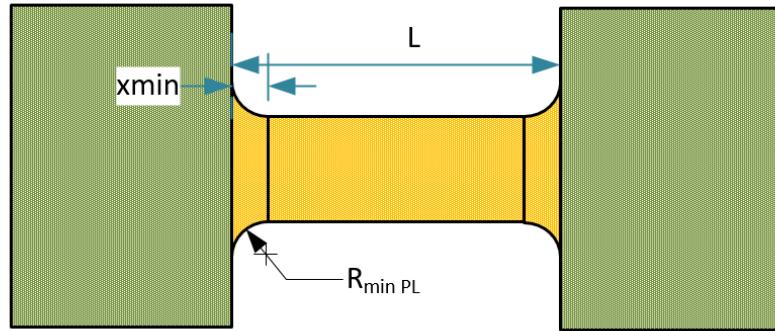
$x_{90}$  - отступ от зоны сгиба до жесткой части,

$T$  – толщина жесткой части печатной платы.

Отсюда общая длина шлейфа на  $90^\circ$  получается из соотношения

$$L_{90} = 2x_{90} + \frac{2\pi R_{90}}{4}$$

ООО «Резонит» [13] требует либо иметь скругление от жесткой части к гибкой минимального радиуса 1 мм либо ввести в твердую часть вырез минимального диаметра 1 мм. Остановимся на сглаженном переходе. Область этого перехода также не стоит сгибать, значит появляется дополнительное ограничение  $x \geq R_{\min PL} \geq 1$  мм . При этом общая длина шлейфа рекомендована не меньше 5 мм, короче можно только по согласованию с производителем.



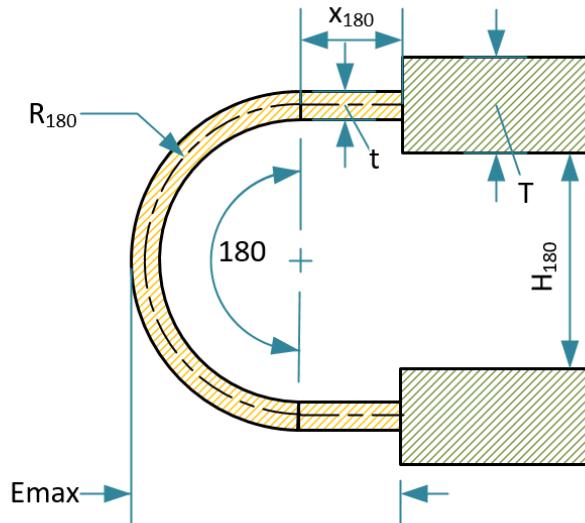
Также нужно помнить, что на радиус сгиба двуслойной гибкой части есть свое ограничение  $R \geq 10 \times t$ , где  $t$  – толщина гибкой части [13]. Если гибкая часть имеет более двух слоев, то требование минимального радиуса сгиба ужесточается до  $R \geq 20 \times t$ .

Отсюда можно вывести несколько соотношений, по которым можно выбирать длину шлейфа  $L_{90}$  и радиус сгиба  $R_{90}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{90} + R_{90} = H_{90} - T / 2 \approx 9,2 \text{ мм} \\ L_{90} = 2x_{90} + \frac{\pi R_{90}}{2} \\ x_{90} \geq 1 \text{ мм} \\ R_{90} \geq 10t \approx 2,3 \text{ мм} \\ L_{90} \geq 5 \text{ мм} \end{array} \right.$$

Для проектирования удобно, если шлейф имеет целую длину, путь это будет значение  $L_{90} = 16 \text{ мм}$ . Отсюда можно вывести значение для радиуса сгиба  $R_{90} \approx 5,57 \text{ мм}$  и отступа  $x_{90} \approx 3,62 \text{ мм}$ . Оба эти значения проходят по ограничениям с запасом, что дает запас на неточность изготовления.

Для поворота на  $180^\circ$  можно вывести аналогичные соотношения исходя из рисунка ниже. При этом стоит дополнительного проконтролировать, насколько торчит за пределы платы гибкий шлейф  $E_{180}$ . Расстояние  $H_{180}$  выберем равным 10 мм, чтобы можно было встречные платы соединить стандартной стойкой высотой 10 мм.



$$\begin{cases} 2R_{180} = H_{180} + T \approx 11,6 \text{ мм} \\ L_{180} = 2x_{180} + \pi R_{180} \\ E_{\max} = x_{180} + R_{180} < 10 \text{ мм} \\ x_{180} \geq 1 \text{ мм} \\ R_{180} \geq 10t \approx 2,3 \text{ мм} \\ L_{180} \geq 5 \text{ мм} \end{cases}$$

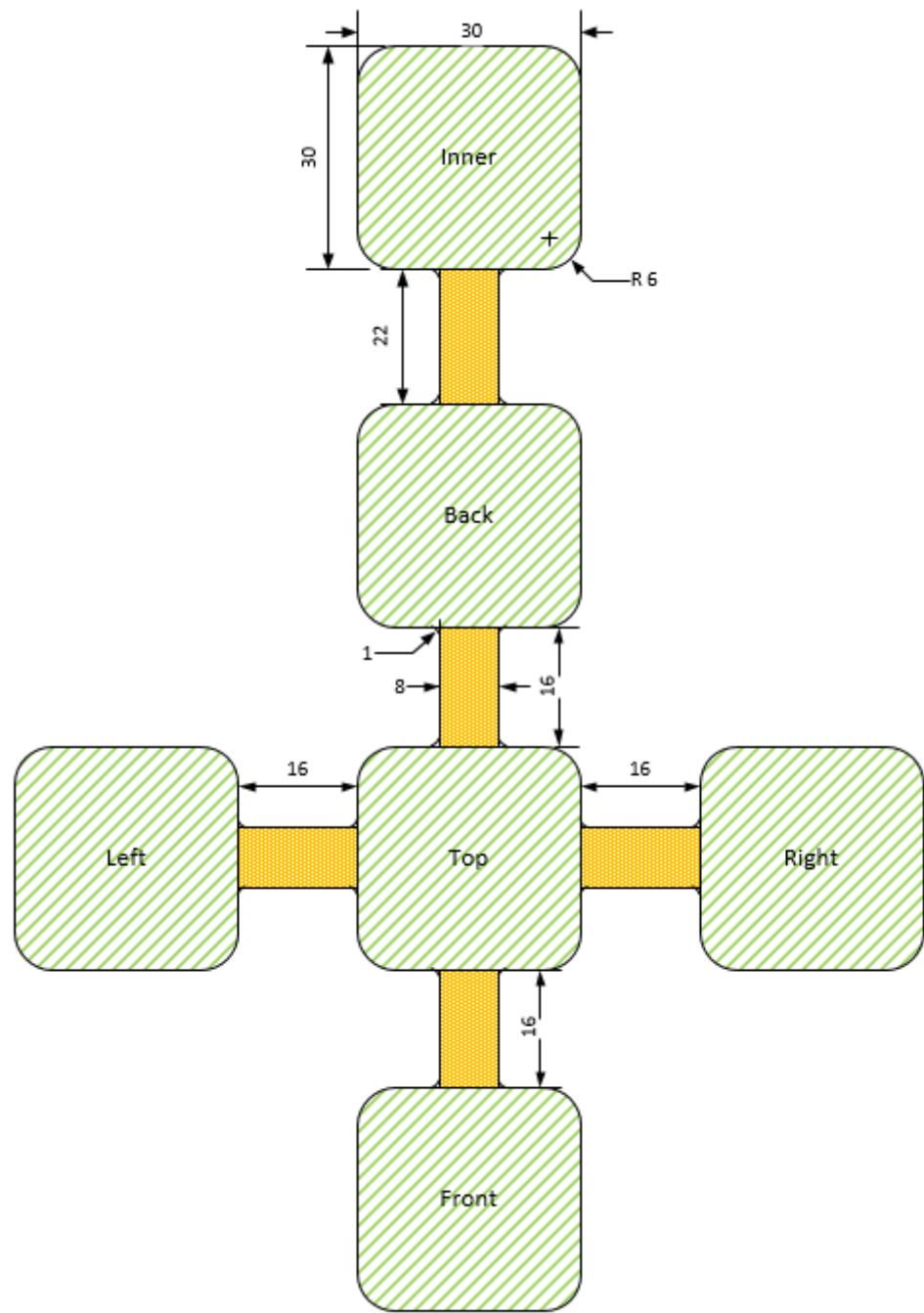
Здесь сразу получается радиус сгиба  $R_{180} \approx 5,8 \text{ мм}$ . Выберем длину шлейфа  $L_{180} = 22 \text{ мм}$ , тогда отступ выходит  $x_{180} \approx 1,9 \text{ мм}$  и шлейф торчит за пределы плат на  $E_{\max} = 7,7 \text{ мм}$ . По всем ограничениям проходим с запасом, что дает запас на неточность изготовления.

Можно переходить к указанию зон. Дальнейшее справедливо для режима работы с гибко-жесткими платами Rigid/Flex (Advanced).

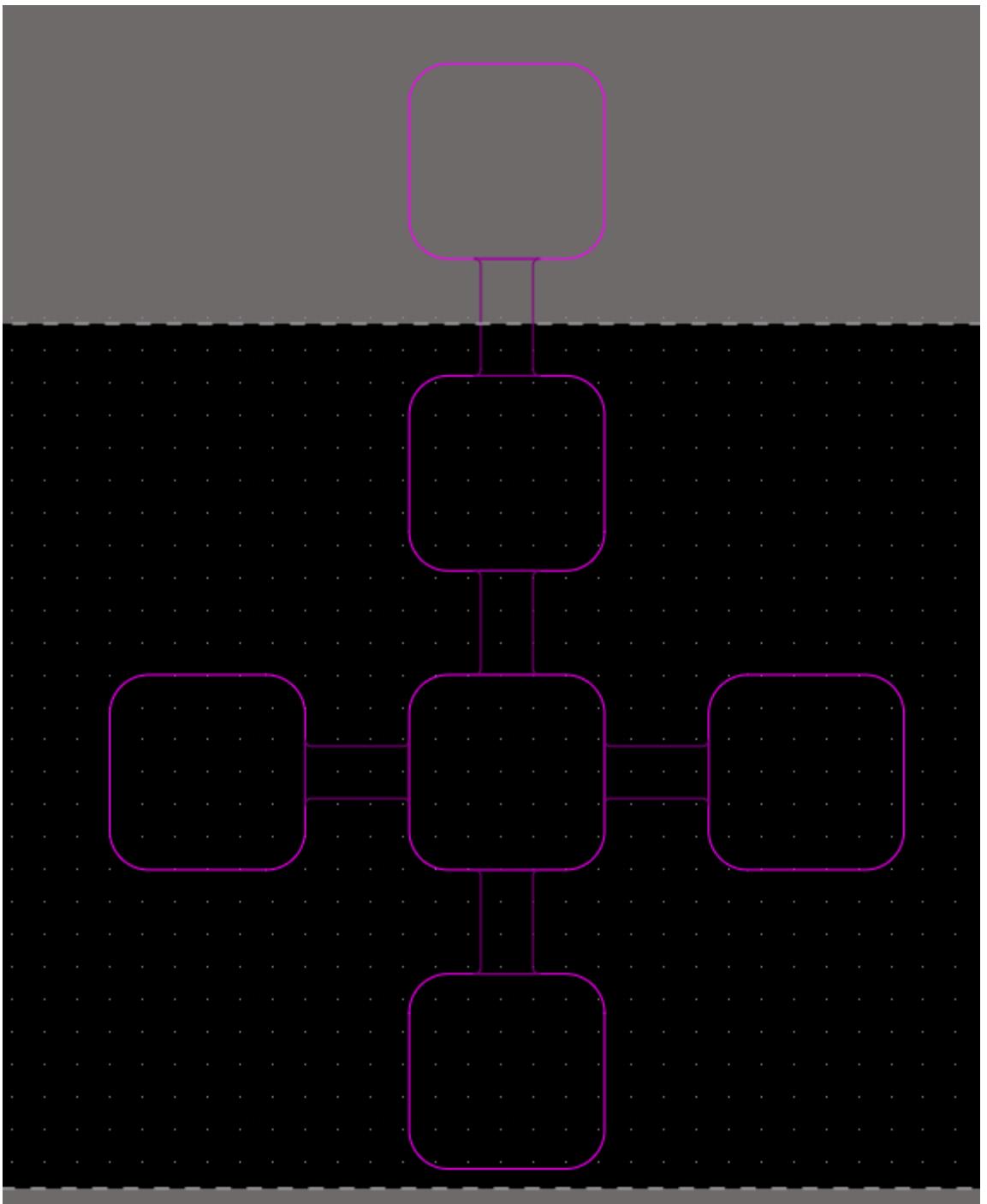
Для удобства формирования герберов и работы с зонами дополнительно к основному слою M5 Board, где находится общий контур печатной платы, нужно доопределить два дополнительных механических слоя, M17 Rigid Board – контура жестких зон и M18 Flex Board – контура гибких зон.

Mechanical Layers (M)	Used On
Board	M5
Flex Board	M18
Rigid Board	M17

Гибко-жесткая печатная плата проектируется в развертке, поэтому общий вид развертки будет следующим. Углы жестких зон сглажены радиусом 6 мм. Ширина шлейфов выбрана по 8 мм.

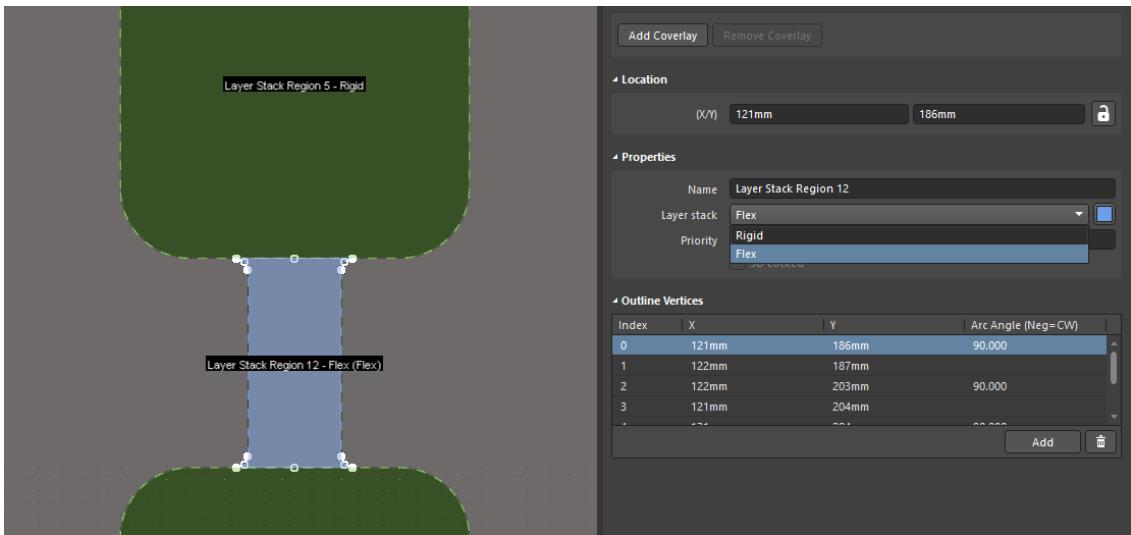


В слое Rigid Board создадим и расположим по чертежу выше шесть сглаженных прямоугольников, а в слое Flex Board пять контуров шлейфов. В контурах шлейфов не забываем добавлять сглаживающие уголки.

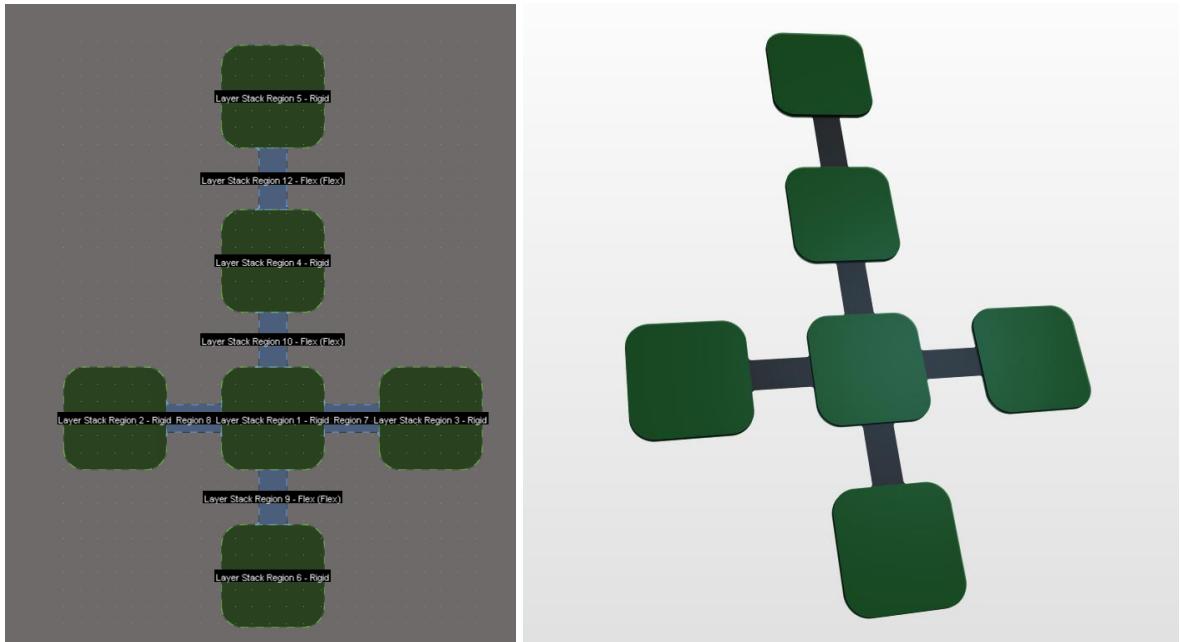


Далее выбираем последовательно контур каждой зоны и по команде Design – Board Shape – Create Board Region from Selected Primitives (D, S, R) создаем поочередно все зоны. При создании зон режим редактирования перескачет в Board Planning Mode (1). В этом режиме также можно определять зоны, но он не очень удобен для задания хоть сколько-нибудь сложных геометрий.

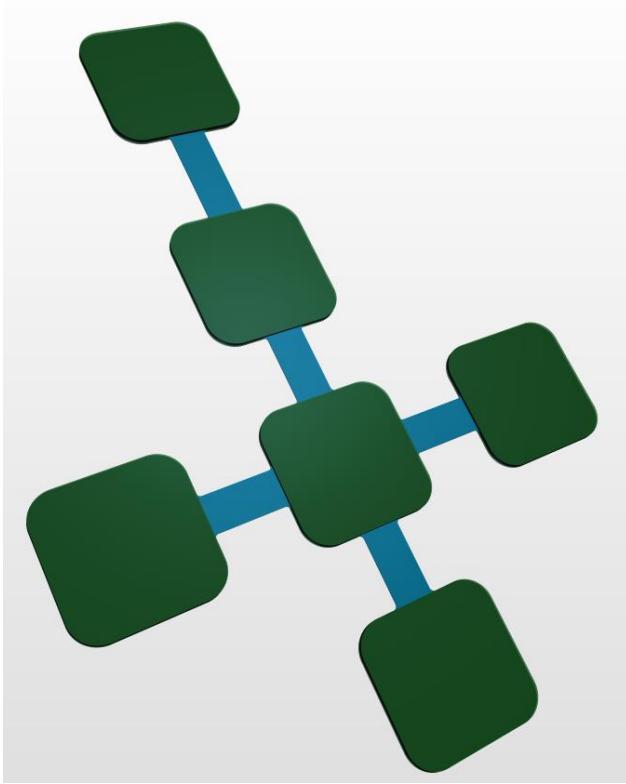
После создания всех зон, необходимо им всем задать нужный субстек. Жестким участкам присвоим субстек Rigid, гибким – Flex.



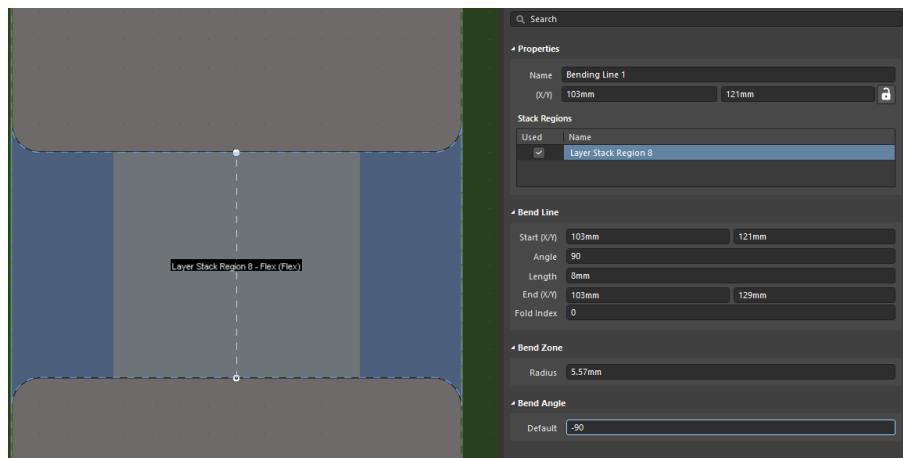
В режиме 3D удобно контролировать разложение субстеков по зонам.



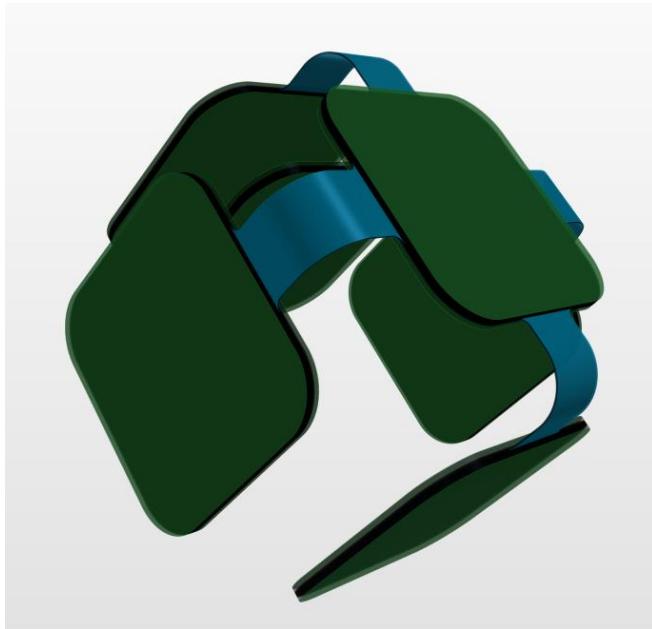
Также решено гибкие части закрывать защитной покровной пленкой. В гибкой зоне нужно выполнить команду ПКМ – Overlay Actions – Add Overlay или в свойствах субстека кнопка Add Overlay. В 3D-режиме гибкие части с покровной пленкой будут иметь голубой цвет.



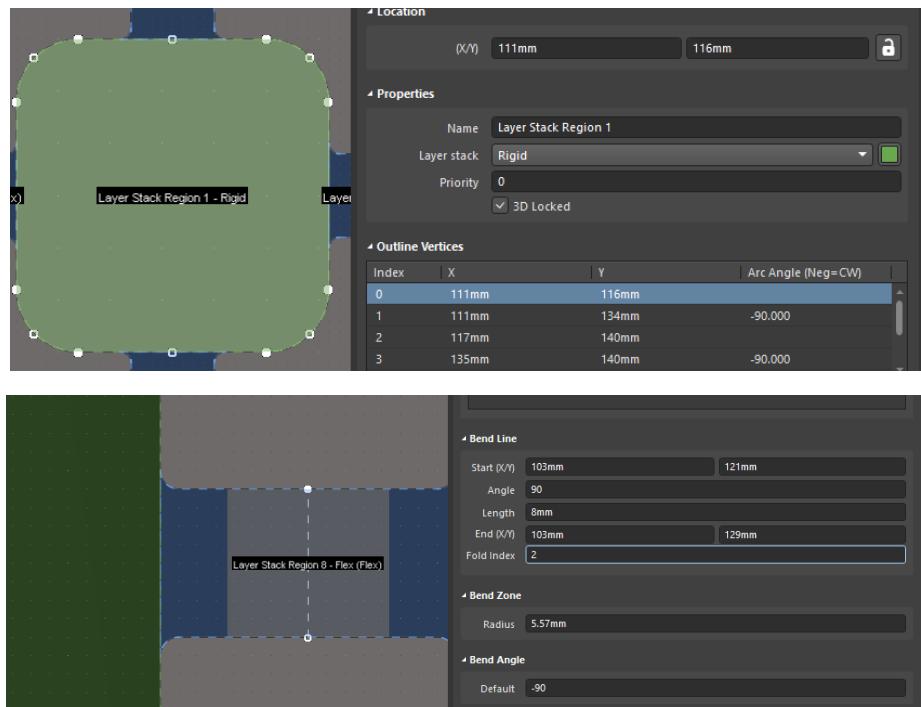
Далее нужно задать шлейфам линии сгиба. Линия создается задается в режиме Board Planning Mode (1) через команду Place – Define Bending Line (P, E). Их необходимо построить поперек гибких зон с привязкой к середине шлейфов. В настройках указывается радиус и угол сгиба. Радиусы были посчитаны ранее (5,57 мм для углов 90°, 5,8 мм для 180°), знак углов вводится отрицательным, чтобы направление сгиба было вглубь от плоскости экрана.



В режиме 3D можно по команде View – 3D View Control – Fold/Unfold (Num5) свернуть и развернуть гибко-жесткую печатную плату, чтобы увидеть, как она будет выглядеть свернутой в 3D.



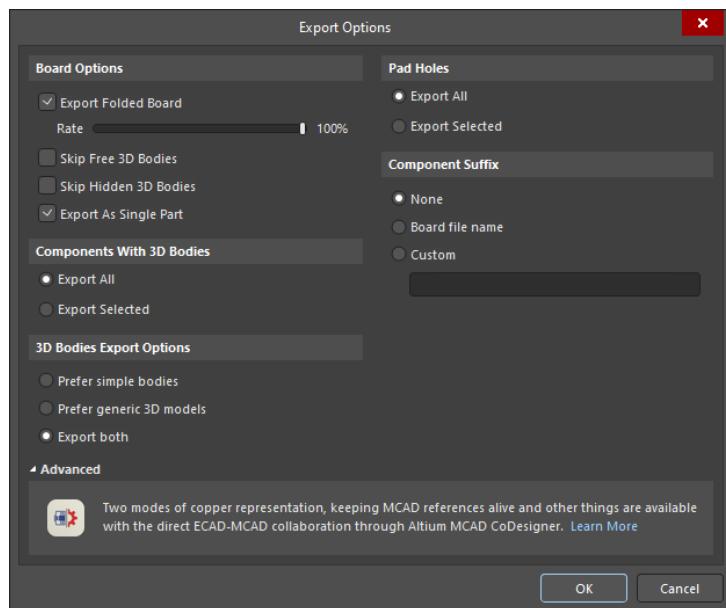
Дополнительно через две настройки еще можно управлять режимом сворачивания. В настройках жестких зон есть галка 3D Locked, с помощью которой выбирается, какая из жестких зон будет опорной (останется в плоскости экрана), а все остальное будет сворачиваться относительно нее. В настройках линий сгиба есть поле Fold Index, целыми числами в котором указывается порядок выполнения сгибов.



Далее по идее можно переходить к собственно разводке топологии. Однако, стоит сначала в 3D проанализировать заготовку гибко-жесткой печатной платы в свернутом состоянии, чтобы убедиться, что проведенные выше вычисления размеров гибких зон и параметров линий сгиба корректны.

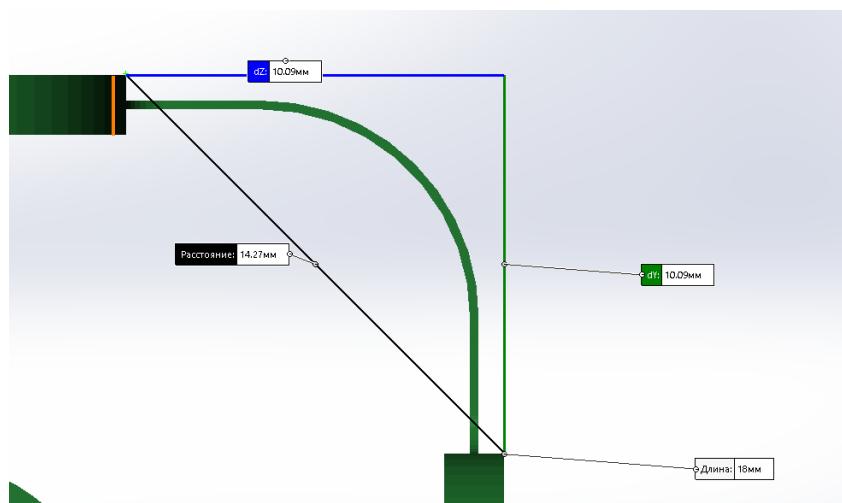
К сожалению, 3D-режим в Altium Designer не позволяет удобно измерить размеры в 3D, для этого придется перенести файл печатной платы в механический САПР.

По команде File – Export – Step 3D экспортим заготовку печатной платы в формат step и проанализируем его в MCAD. После указания имени экспортированного файла в окне настроек экспорта укажем, что плату надо экспортовать в свернутом состоянии Export Folded Board и единой деталью Export As Single Part. Остальные настройки на текущем этапе не имеют значения, т.к. компонентов и разводки на печатной плате еще нет.

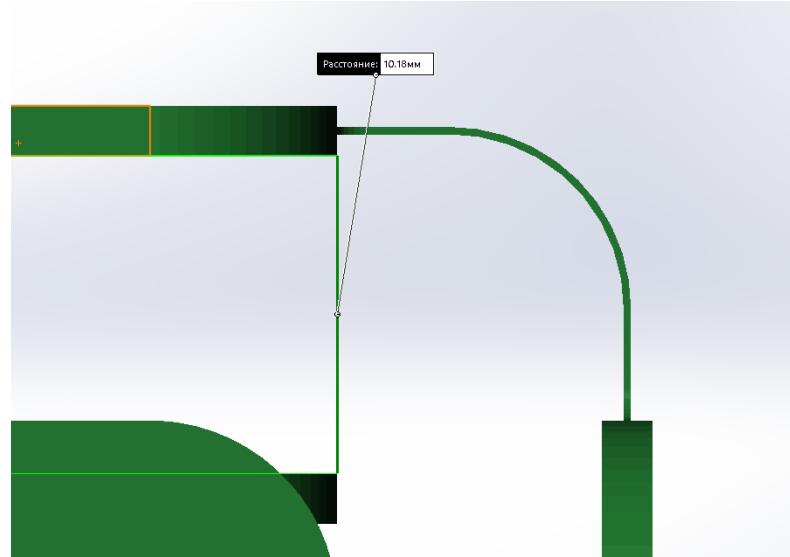


В MCAD после импорта step-файла измерим следующие размеры:

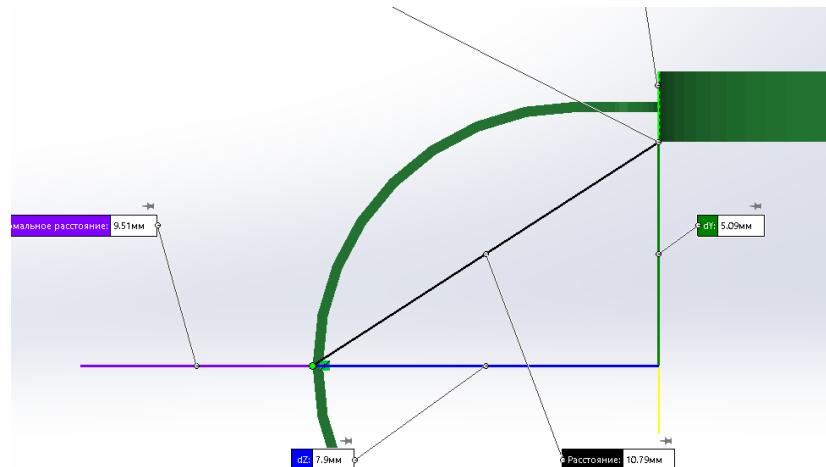
- сдвиг для поворотов на  $90^\circ$  ( $H_{90}$ ), получился 10,09 мм



- расстояние между параллельными платами на повороте  $180^\circ$  ( $H_{180}$ ), получилось 10,18 мм



- размер вылета шлейфа на повороте  $180^\circ$  ( $E_{180}$ ), получилось 7,9 мм



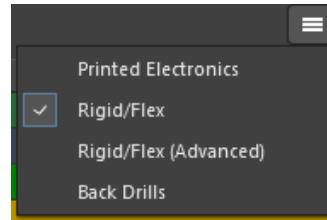
Размеры получились с некоторой ошибкой по сравнению с тем, какими они были рассчитаны изначально. Связано это с тем, что в расчетах не учитывалась физическая толщина гибкой части и модель ее сгиба. На текущем этапе рекомендовано подобрать параметры радиусов сгиба  $R_{90}$  и  $R_{180}$ , чтобы получить более чистую 3D-модель свернутой печатной платы.

При подборе были обновлены значения  $R_{90} = 5,15$  мм и  $R_{180} = 5,71$  мм , введем их в соответствующие параметры линий сгиба.

Определение контура печатной платы закончено, можно переходить к разводке топологии.

## Стандартный режим определения стека и зон

Если продвинутый режим работы с гибко-жесткими платами недоступен, то можно провести подготовку в стандартном режиме Rigid/Flex.

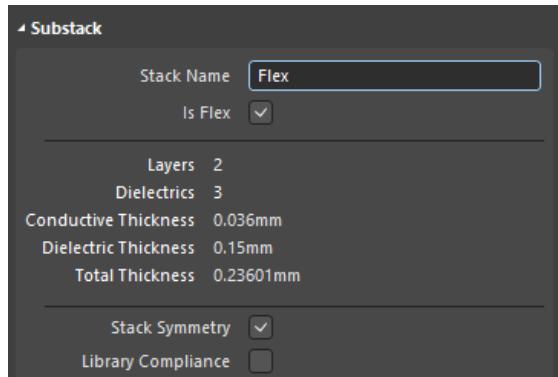


В этом режиме нет понятия ветвей, есть только субстеки. Субстеки создаются по кнопке +, текущий субстек выбирается в выпадающем списке. При этом отображаются все слои и с помощью галочек выбираются те, которые используются в текущем субстеке.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Rigid Top Overlay		Overlay				
	Flex Top Coverlay	LF0100	Coverlay		0.025mm	4	0.005
	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
	Top Surface Fini...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm		
1	Top Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm		
	Dielectric 1	FR4_HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016
	Dielectric 6	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
	Dielectric 7	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
	Adhesive 1	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02
2	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm		
	Dielectric 4	AP8545R	Core		0.1mm	3.4	0.002
3	Int (PWR)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm		
	Adhesive 2	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02
	Dielectric 3	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
	Dielectric 5	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
	Dielectric 2	FR4_HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016
4	Bottom Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm		
	Bottom Surface...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm		
	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
	Flex Bottom Cov...	LF0100	Coverlay		0.025mm	4	0.005
	Board Layer Sta...		Overlay				

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Rigid Top Overlay		Overlay				
	Flex Top Coverlay	LF0100	Coverlay		0.025mm	4	0.005
	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
	Top Surface Fini...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm		
1	Top Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm		
	Dielectric 1	FR4_HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016
	Dielectric 6	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
	Dielectric 7	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
	Adhesive 1	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02
1	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm		
	Dielectric 4	AP8545R	Core		0.1mm	3.4	0.002
2	Int (PWR)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm		
	Adhesive 2	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02
	Dielectric 3	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
	Dielectric 5	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
	Dielectric 2	FR4_HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016
4	Bottom Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm		
	Bottom Surface...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm		
	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
	Flex Bottom Cov...	LF0100	Coverlay		0.025mm	4	0.005
	Board Layer Sta...		Overlay				

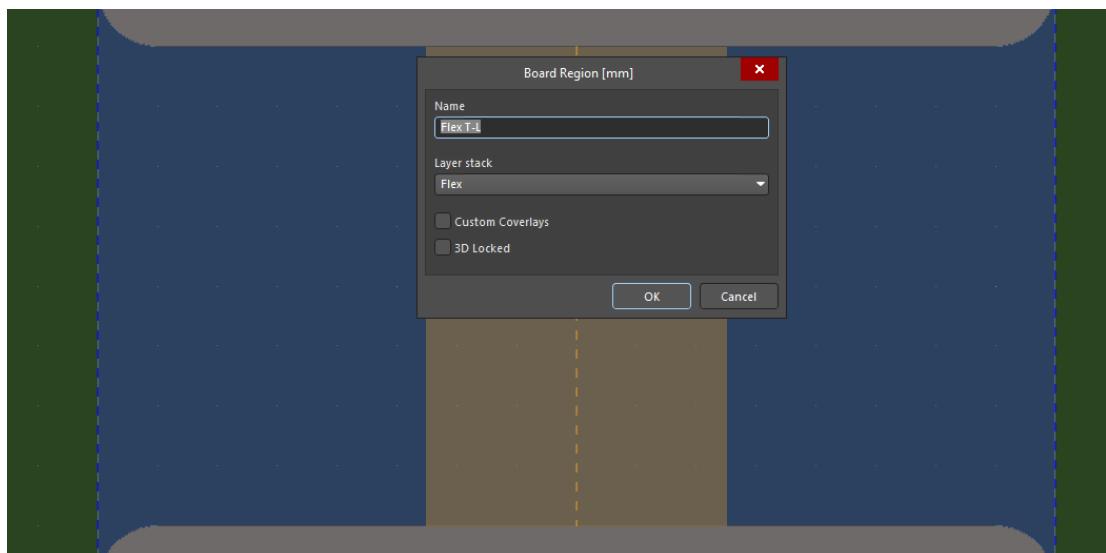
Дать имя субстеку и указать тип стека гибкий или жесткий можно в панели Properties в группе Substack. Также стандартный режим определения стека гибко-жесткой печатной платы поддерживает проверку симметричности стека Stack Symmetry, которая недоступна в продвинутом режиме.



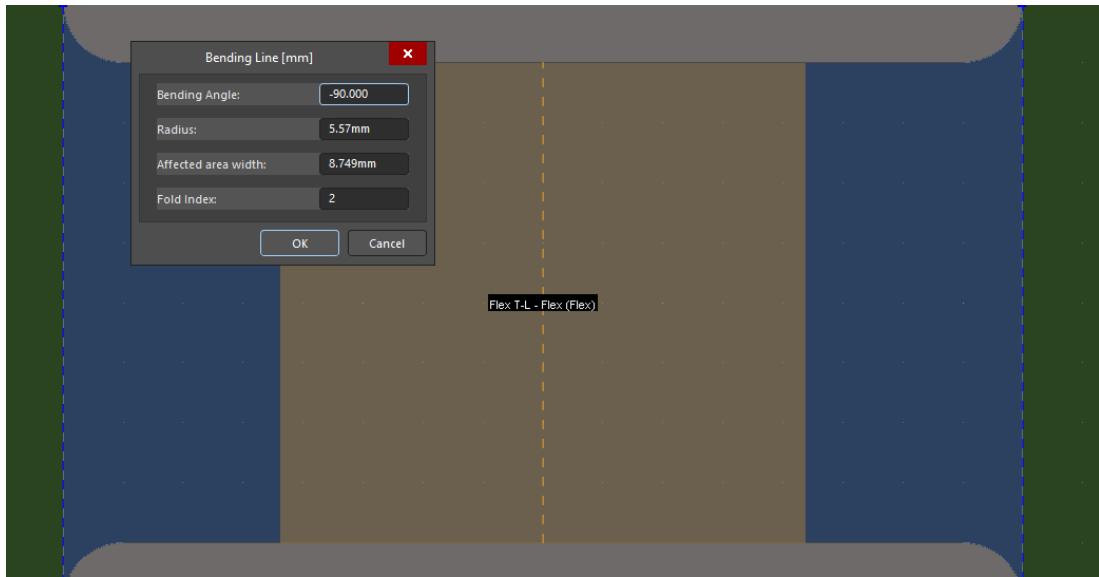
При определении геометрии печатной платы необходимо сначала создать весь внешний контур печатной платы, а затем с помощью инструмента Split Line в режиме Board Planning Mode разделить всю плату на зоны. Split Line ставится по команде Design – Define Split Line (D, S) в пределах существующей зоны с последующей правкой концевых точек.



После размещения границ зон, плата автоматически разбивается на зоны, которым по ДЛКМ можно выбрать субстек и дать имя.

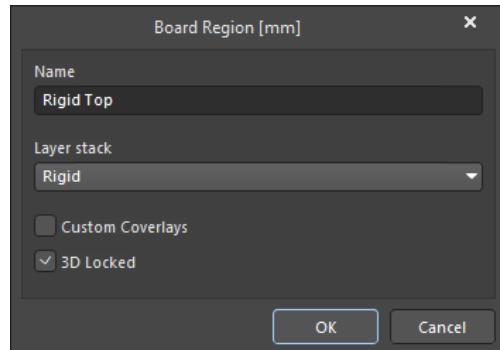


В гибких зонах автоматически появляется линия сгиба (Bending Line). Управляется она по ДЛКМ по концевым точкам линии сгиба. При этом в одну гибкую зону можно добавить несколько зон сгиба по Design – Define Bending Line (D, E).



В параметрах линии сгиба указывается угол сгиба (знак угла задает направление), радиус и ширина зоны сгиба, а также порядок сгиба при сворачивании печатной платы в 3D-режиме.

У жестких зон в свойствах есть галка 3D Locked, которая позволяет выбрать ту жесткую зону, которая будет зафиксирована при сворачивании гибко-жесткой печатной платы в 3D-режиме.



## Особенности подготовки правил разводки топологии

Подготовка правил разводки топологии гибко-жестких печатных плат требует учета нескольких дополнительных моментов по отношению к обычной жесткой печатной плате.

Если в проекте есть линии с контролируемым импедансом и используется инструмент профиля импедансов, то расчеты необходимо

проводить расчеты на всех субстеках. Нужно помнить, что т.к. в жесткой и гибкой части стек отличается, то и значения ширин/зазоров в общем случае даже для одного слоя, но в разных стеках будут отличаться. В примере необходимо подготовить правила для дифпары USB на 90 Ом дифференциального сопротивления. Решено остановиться на следующих размерах для жесткой части:

Слои Top и Bottom – 0,3 мм/0,15 мм/0,3 мм (w/gap/w);

Слои Int1 и Int2 – 0,15 мм/0,2 мм/0,15 мм (w/gap/w).

D90 (TopD90)					DC90							
#	Name	Material	Type	Weight	T	Top Ref	Bottom Ref	Width (...)	Trace Ga...	Impedance...	Deviat...	Delay...
	Top Overlay		Overlay									
	Top Solder	SM-001	Solder Mask		0.							
	Top Surface Fini...	Gold	Surface Finish		0.							
	Top Layer	Cu	Signal	1oz	0.	1 - Int1 (GND)	0.3mm	0.15mm	96.2	6.89%	5.8568...	
	Dielectric 1	FR4_HiTg170	Core		0.							
	Dielectric 2	FR4_HITg17...	Prepreg		0.							
	Dielectric 8	FR4_HiTg17...	Prepreg		0.							
	Dielectric 6	LF0100	Adhesive		0.							
	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.	Top Lay...	2 - Int2 (PW...	0.15mm	0.2mm	90.74	0.83%	6.4253...
	Dielectric 3	AP8545R	Core		0.							
	Int2 (PWRnSIG)	Cu	Signal	1/2oz	0.	1 - Int1...	Bottom Layer	0.15mm	0.2mm	90.74	0.83%	6.4253...
	Dielectric 7	LF0100	Adhesive		0.							
	Dielectric 9	FR4_HiTg17...	Prepreg		0.							
	Dielectric 4	FR4_HiTg17...	Prepreg		0.							
	Dielectric 5	FR4_HiTg170	Core		0.							
	Bottom Layer	Cu	Signal	1oz	0.	2 - Int2...		0.3mm	0.15mm	96.2	6.89%	5.8568...
	Bottom Surface...	Gold	Surface Finish		0.							
	Bottom Solder	SM-001	Solder Mask		0.							
	Bottom Overlay		Overlay									

Для гибкой части:

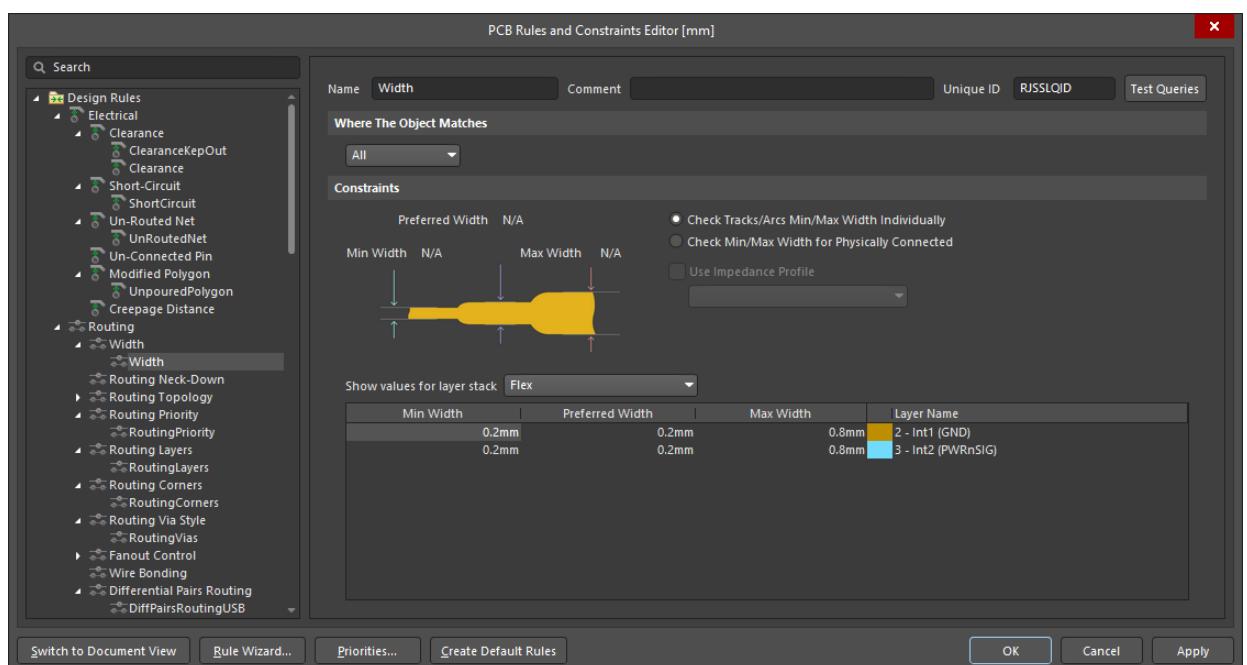
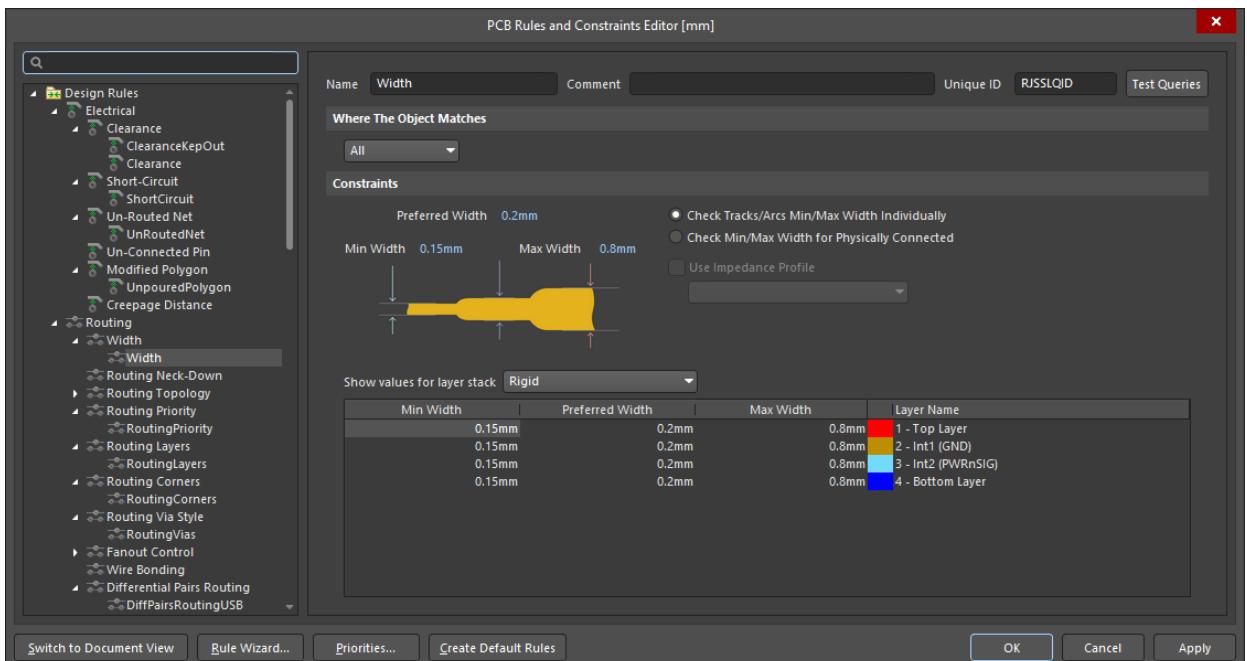
Слои Top и Bottom недоступны;

Слои Int1 и Int2 – 0,2 мм/0,2 мм/0,2 мм (w/gap/w).

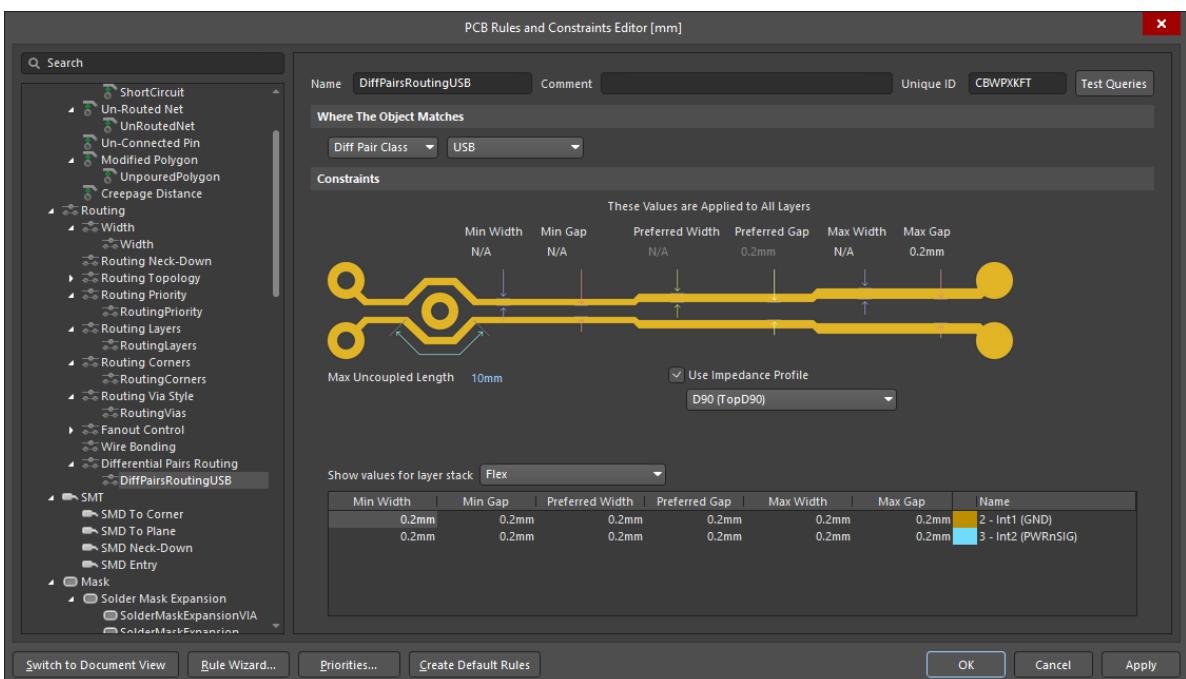
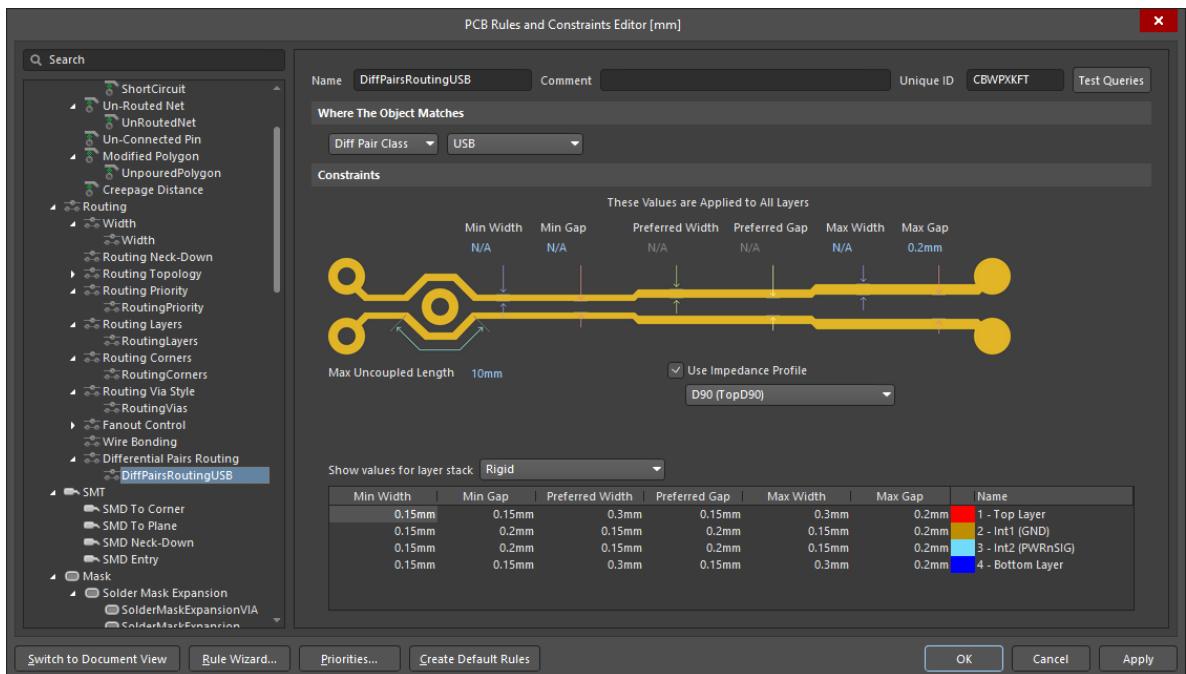
D90 (TopD90)					DC90							
#	Name	Material	Type	Weight	T	Top Ref	Bottom Ref	Width (...)	Trace Ga...	Impedance...	Deviat...	Delay...
	Flex Top Overlay	FC-001	Coverlay		0.							
	Dielectric 6	LF0100	Adhesive		0.							
1	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.	2 - Int2 (PW...	0.2mm	0.2mm	89.64	0.4%	5.6961...	
2	Int2 (PWRnSIG)	Cu	Signal	1/2oz	0.	1 - Int1...		0.2mm	0.2mm	89.64	0.4%	5.6961...
	Flex Bottom Cov...	FC-001	Coverlay		0.							

В правилах Routing - Width и Routing - Differential Pairs Routing появляется переключатель субстека, и эти правила теперь содержат в себе несколько независимых правил, действующих в пределах соответствующего субстека. Управляется в выпадающем списке Show values for layer stack. Соответственно, нужно заполнить размеры ширин для всех субстеков.

Ниже показано правило ширин Width для жесткой и гибкой части.



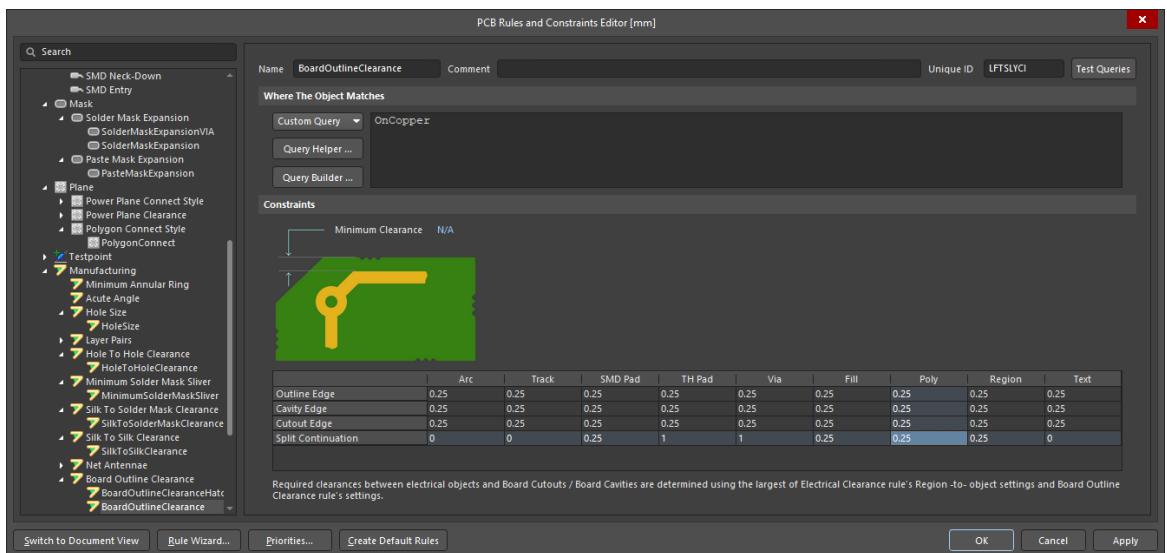
Для USB-цепей, определенных в классе USB, сошлемся на профиль импеданса D90, также для жесткой и гибкой части.



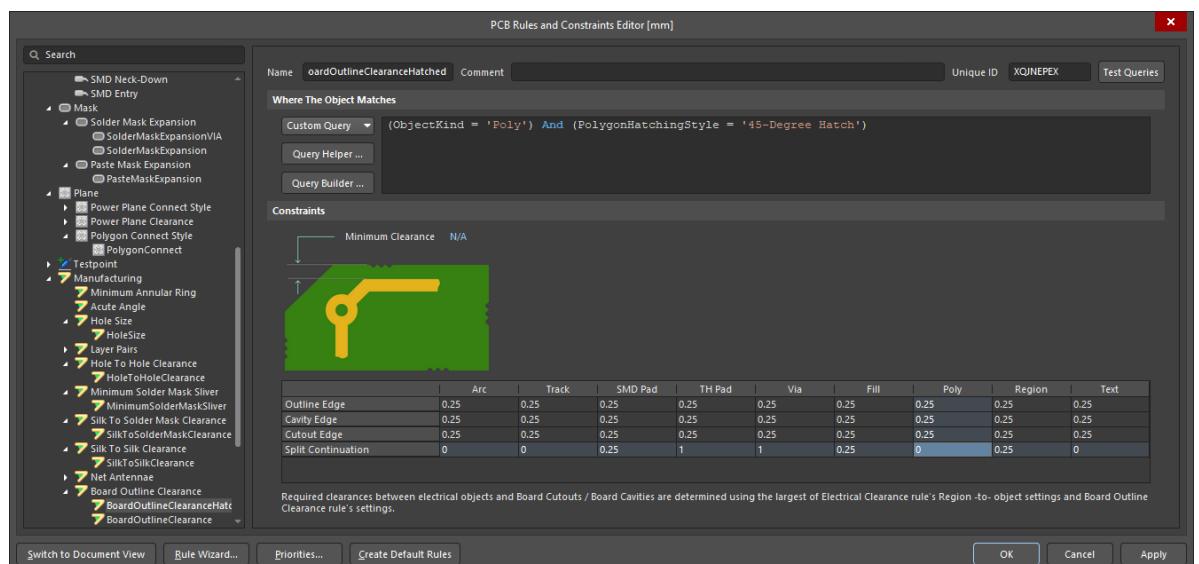
*Примечание: по состоянию на версию Altium Desginer 24.10 присутствует баг. При разводке режимы интерактивной разводки берут размеры из правил соответствующих жесткой и гибкой части, и разводка работает ожидаемо. А вот проверка DRC по непонятной причине игнорирует размеры для гибкого субстека и использует для проверки размеры из жесткого субстека. Обойти это можно, например, добавив комнату под размер гибкой зоны и добавив дополнительное правило с запросом `WithInRoom()` с соответствующими размерами (но ссылка на профиль импеданса корректно работать не будет). Или можно использовать запрос `InLayerStackRegion()`, где указать имя зоны субстека.*

Также необходимо отредактировать правило Manufacturing – Board Outline Clearance, действующее на металлизированные слои (OnCopper). Строке от границ печатной платы (Outline Edge) укажем стандартные зазоры 0,25 мм для фрезеруемых контуров [13].

Для строки границы между зонами (Split Continuation) нужно определить свой список зазоров. Зазор до разводки цепей (Arc и Track) нужно поставить 0, чтобы можно было провести цепи через границу. SMT-падам и полигональным объектам поставим зазор 0,25 мм, соответствующий стандартному зазору от границ платы; кроме того сплошные заливки по гибким частям делать нежелательно. Сквозным падам и отверстиям поставим зазор 1 мм.



При этом на одном из шлейфов все-таки придется сделать заливку. Делать ее будем сетчатой под 45°. В индивидуальном правиле отберем заливки с сеткой под 45° и разрешим ей пересекать границу зон Split Continuation.



## Особенности разводки топологии

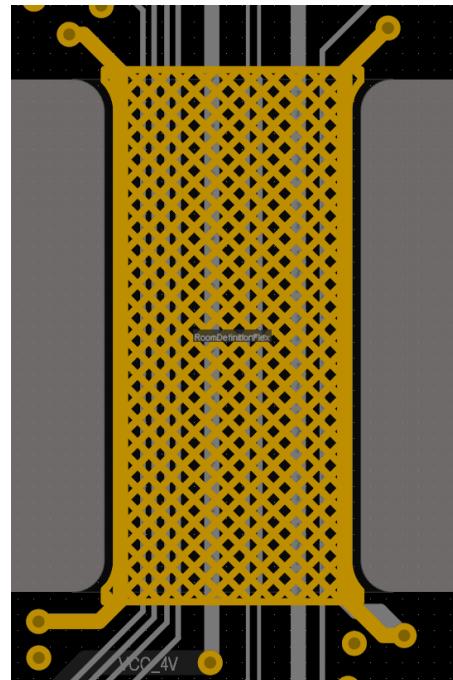
При использовании гибких частей как шлейфов между жесткими зонами, стоит продумать, на каком слое что разводить. В обычном типовом четырехслойном стеке как правило, основная разводка ведется на внешних слоях Top и Bottom. Если компоненты в основном расположены на верхней стороне, то на втором слое Int1 как правило земля и на третьем слое Int2 разводится питание и часть управления. В используемом гибко-жестком стеке слой Int1 становится верхним слоем для гибкой части, на нем будем располагать земляную цепь. А слой Int2 становится нижним слоем для гибкой части, в нем будем разводить питание и управляющие цепи между жесткими зонами.

При этом, с учетом выбранной конструкции может выйти так, что на некоторых жестких зонах слои поменяются местами. Например, на грани Inner на слое Top оставим только разъем к LiPol-аккумулятору, а контроллер питания и зарядки с его обвязкой переместим на слой Bottom, чтобы они не касались LiPol-аккумулятора. В этом случае, на грани Inner на слое Int1 будут цепи питания и управления, а на слое Int2 будет земля.

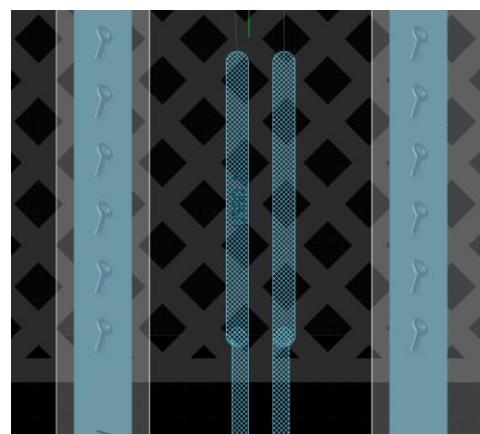
ООО «Резонит» [13] настоятельно рекомендует для надежности добавить относительно широкие медные полоски по краям гибкой части с отступом от края гибкой части на 0,25 мм. В каждом из шлейфов добавим таких защитных линий на слоях Int1 и Int2 шириной 0,5 мм и подключим их к цепи GND. Также во всех шлейфах (кроме перехода между верхней и задней гранью) на слое Int1 сразу добавим несколько широких линий, имитирующих земляную заливку, т.к. использование заливок на гибких частях технологически нежелательно. При последующей работе с земляными заливками в жестких зонах надо будет проследить, чтобы данные линии к ней присоединились.



У шлейфа, соединяющего верхнюю и заднюю грань земляная заливка на слое Int1 нужна, т.к. по слою Int2 здесь будет идти дифпара, которой нужен свой опорный уровень. Делать эту заливку сплошной нельзя, поэтому воспользуемся сетчатым полигоном с заливкой под  $45^\circ$ . Размеры сетки возьмём 0,2/0,5 (ширина линий/шаг сетки). Также нужно, чтобы эта заливка соединилась с заливками на жестких частях. Поэтому выше было подготовлено индивидуальное правило и зона сетчатой заливки немножко накладывается на соседние заливки.

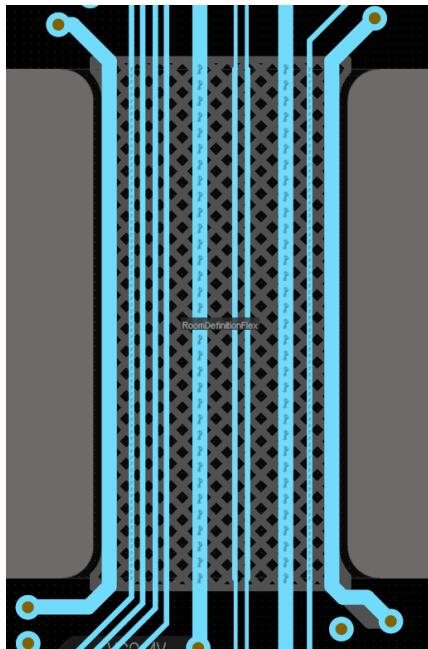


При разводке цепей при переходе между жесткой и гибкой зоной будут автоматически перестраиваться ширины и зазоры в зависимости от правил. В примере это видно при разводке USB-цепи.



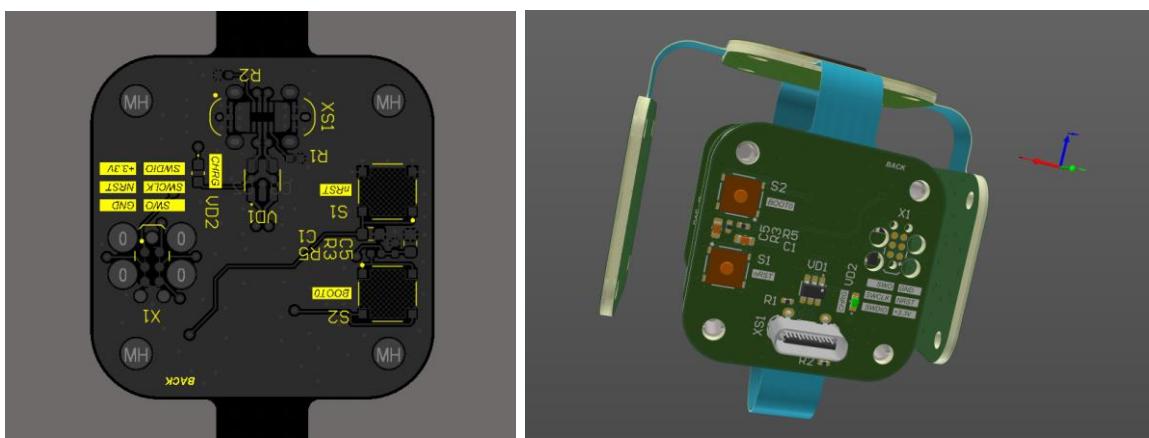
На гибких зонах не стоит без необходимости поворачивать цепи, крайне желательно, если разводка идет ровно поперек линий сгиба, а также все цепи расположены более-менее равномерно по всей ширине шлейфа. Ну и при

подводе к гибким зонам нужно помнить про зазор 1 мм от отверстий до перехода между зонами.



Как было сказано ранее, не нужно без необходимости добавлять заливки на гибкие зоны. Можно в гибкие зоны добавить зоны запрета заливок в виде Keepout-ов с запретом на заливки или вырезы в полигонах Polygon Cutout на слоях Int1 и Int2. Или как вариант формировать заливки индивидуально для каждой жесткой зоны по контурам в слое Rigid Board.

При финализации шелкографии имеет смысл повернуть позиционные обозначения компонентов и информационные строки так, чтобы их было удобно читать будущему пользователю устройства, т.е. когда печатная плата находится в свернутом состоянии, а не в развертке. В примере это имеет смысл для боковых и задней грани.

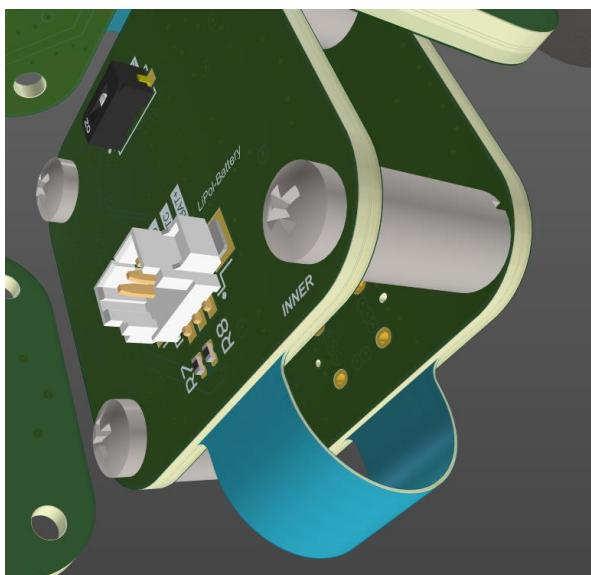


## Добавление механических элементов крепежа

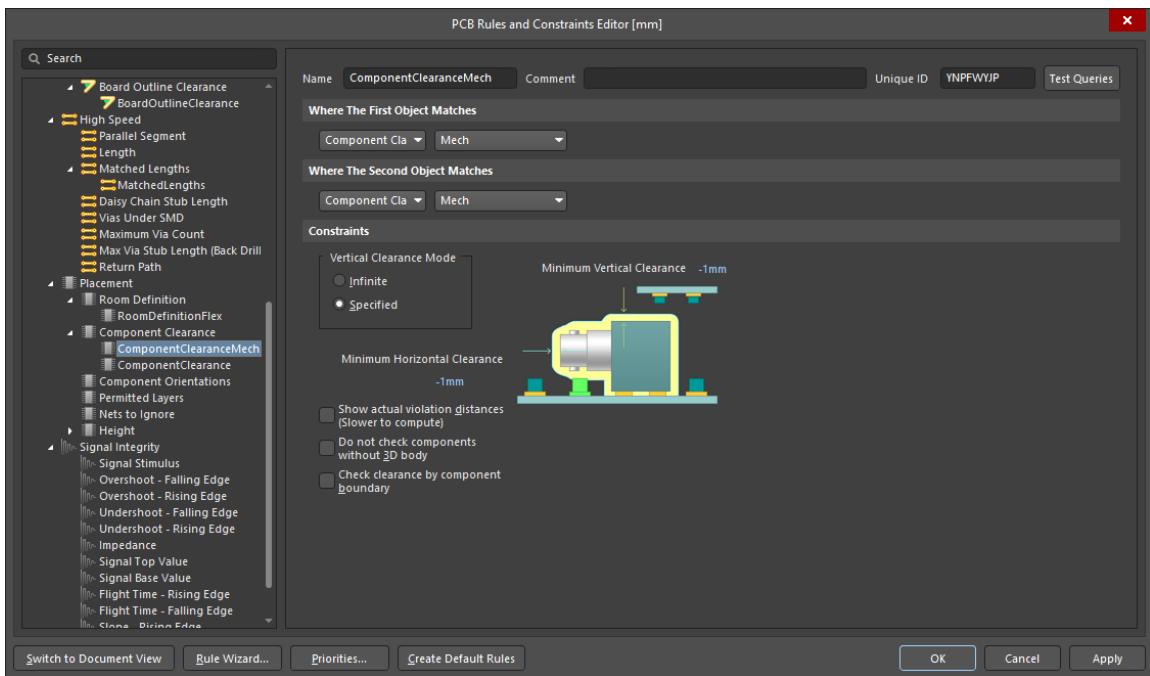
Если гибко-жесткая плата в свернутом положении имеет элементы крепежа между жесткими зонами, то можно еще до передачи проекта конструктору-механику внести некоторый крепеж в проект, чтобы иметь возможность как можно ранее учитывать их в проекте.

В проекте грани Back и Inner заворачиваются друг на друга и будут располагаться параллельно на расстоянии 10 мм. Предполагается, что будут использованы стойки на 10 мм. Стойки M2,5x10 расположим на обратной стороне на грани Inner, а винты M2,5 их крепящие – на той же грани, но сверху.

В 3D-режиме в свернутом режиме будет хорошо видно, как они установлены.

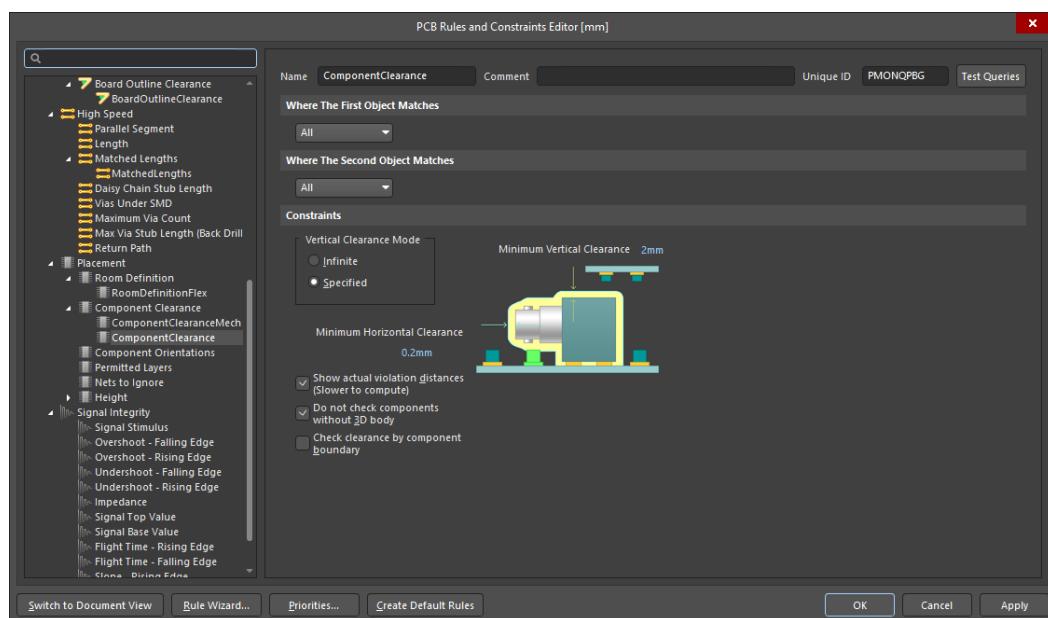


Механические компоненты можно внести как свободные 3D-тела или как свободные посадочные места. Если механические компоненты внесены как свободные посадочные места, то для того, чтобы винт и стойка не порождали ошибки Component Clearance, добавим все механические компоненты в класс Mech и разрешим им накальваться друг на друга.

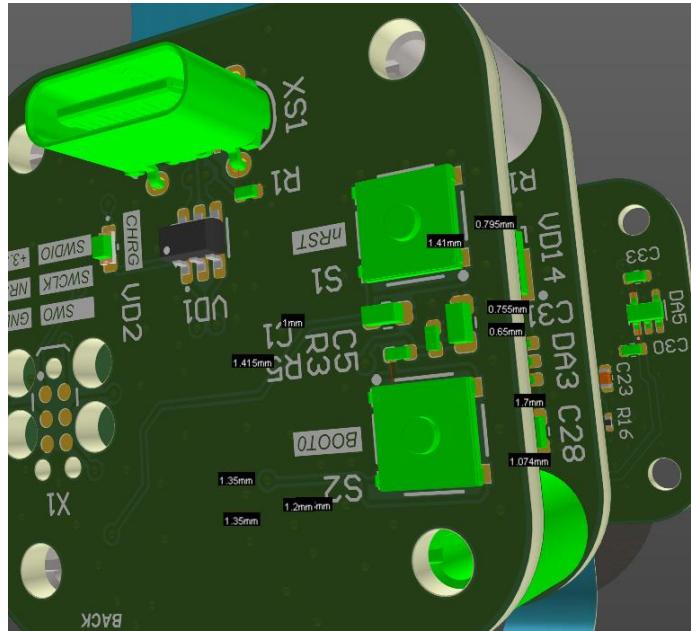


При этом, при финальном экспорте печатного узла механику-конструктору для проработки общего облика изделия, не нужно в 3D-модель экспортировать подобные механические компоненты и включать их в ВОМ и сборочные чертежи уровня печатного узла. Т.к. в любом случае механику-конструктору нужно будет проработать всю конструкцию и гораздо лучше, если все механические компоненты, включая крепеж, отнесены к уровню ячейки или выше.

В текущей версии Altium Desginer есть одна особенность с использованием правила Component Clearance для проверки 3D-режима. Пусть, например, установлен компонентам зазор по вертикали 2 мм, а по горизонтали 0,2 мм.



Теперь, если в 3D-режиме плата развернута, то ошибок не показывается. Однако, если плату свернуть, то появляется большое число ошибок. При этом, если в 3D покрутить модель, то визуально никаких наложений не видно.



Связано это с тем, что при сворачивании гибко-жесткой печатной платы у компонентов очевидно меняются координаты по X и по Y. А вот правило зазоров компонентов Component Clearance это не учитывает и продолжает работать в плоскости экрана. Из-за этого полноценно использовать это правило для определения зазоров в 3D-режиме невозможно и для свернутого режима проверять зазоры компонентов придется в MCAD.

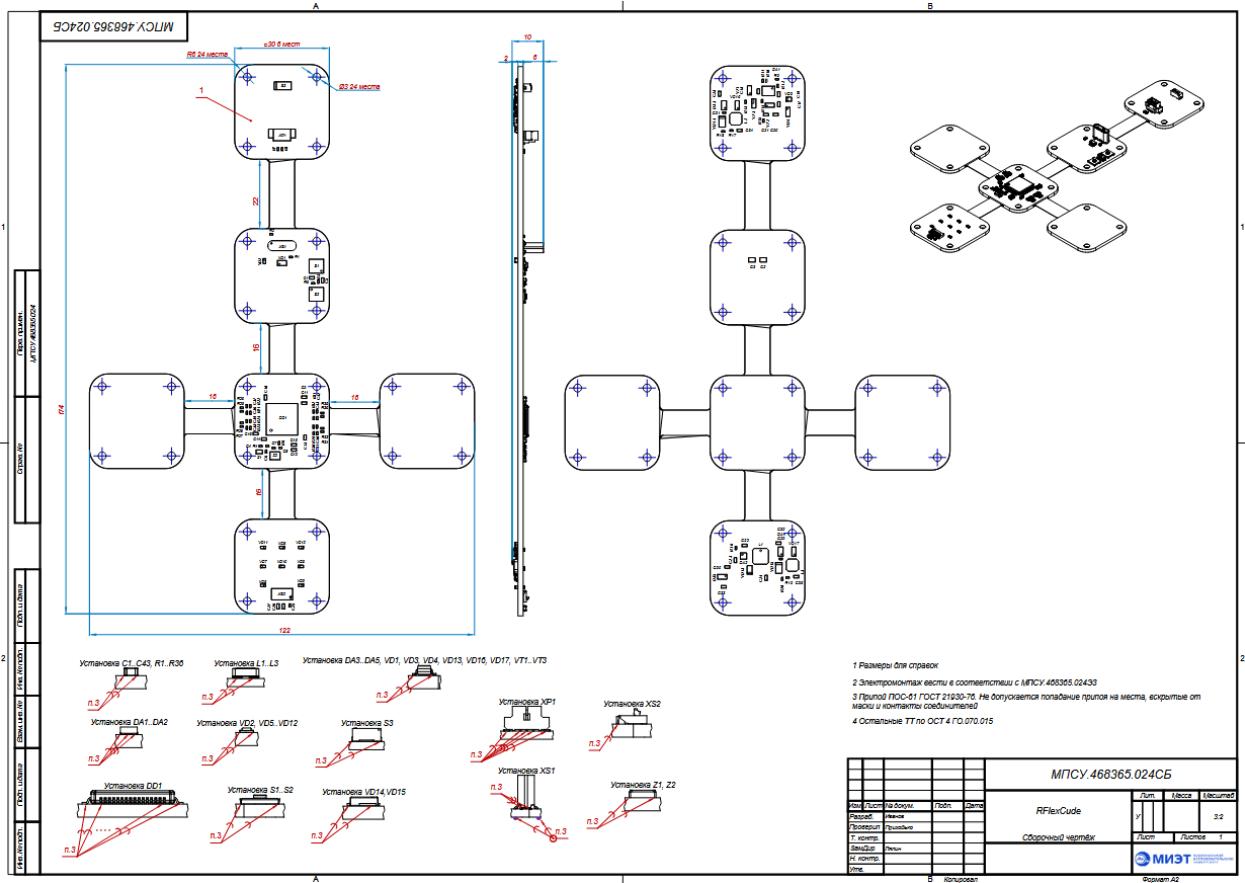
## **Особенности выпуска комплекта конструкторской документации**

В своей основе комплект КД для печатного узла на гибко-жесткой печатной плате не сильно отличается от комплекта КД печатного узла на плате на жестком основании.

Гибко-жесткая печатная плата как правило является сборочной единицей, т.к. изготавливается из нескольких составляющих, соответственно основной конструкторский документ на нее - спецификация. При выборе обозначения гибко-жесткой печатной платы по справочнику ОК 012-93 [11] точного кода для гибко-жестких печатных плат нет. При этом гибко-жесткие печатные платы можно отнести к группе **68728x** «Оборудование электротермическое, электросварочное и для диффузионной сварки. Устройства магнитопроводящие, токопроводящие, электроизолирующие, электромонтажные. Монтаж механический / Устройства электромонтажные. Монтаж механический / Элементы электромонтажные / Панели, платы с элементами объемного монтажа шириной, мм», т.к. изготавливаются они, как и все печатные платы на производстве, в панели.

Как правило, спецификация на печатный узел, схема электрическая принципиальная ЭЗ, перечень элементов ПЭЗ и ведомость покупных ВП выполняются по обычным правилам без каких-либо особенностей, поэтому в примере они не показаны.

Сборка гибко-жесткого печатного узла обычно идет в развернутом виде на ровном столе, поэтому сборочный чертеж на печатный узел также выглядит по-обычному. За исключением того, что возможно стоит подробнее нанести габаритные размеры жестких и гибких зон. И позиционные обозначения компонентов не надо поворачивать для удобства чтения в свернутом виде (как сделано в шелкографии), а их надо оставить в обычной ориентации, чтобы было удобнее монтажнику.



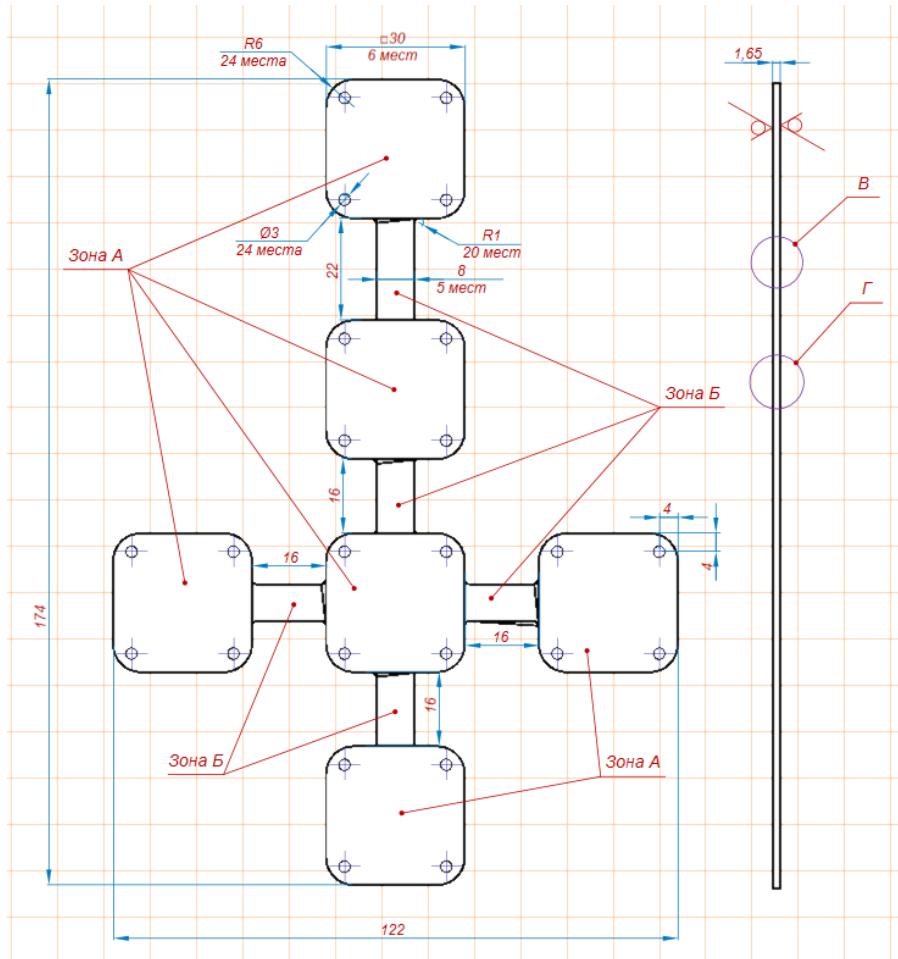
В документации на собственно гибко-жесткую печатную плату в спецификации на нее необходимо перечислить используемые материалы диэлектриков. При возможности также стоит посчитать необходимый расход материалов исходя из стека.

Номер документа	Группа №	Наименование	Кол.	Примечание	
		Формат	Лист		
<u>МПСЧ.687281.024</u>					
А3	МПСЧ.687281.024СБ	<u>Обозначение</u>		<u>Наименование</u>	
		<u>Документация</u>		<u>Кол.</u>	
		<u>Материалы</u>		<u>Примечание</u>	
1	МПСЧ.687281.024Д1	Стеклотекстолит FR-4 HiTg170		125 см <sup>2</sup>	
		0,51мм (фольга 18мкм)			
		Полиимидная пленка DuPont AP8545R 0,1мм (фольга 18мкм)		72 см <sup>2</sup>	
2	МПСЧ.687281.024Т5М	Нетекущий эпоксидный пропрэг		250 см <sup>2</sup>	
		Tg170 70мкм			
		Адгезивная пленка DuPont Pyralux		144 см <sup>2</sup>	
3	МПСЧ.687281.024Д2	25мкм			
		Покрытия пленка DuPont Pyralux		20 см <sup>2</sup>	
		LF0110 25мкм			
<b>МПСЧ.687281.024</b>					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Разраб.	Иванов				Лит.
Проб.	Приходько				Лист
Зам.Дир.	Лялин				Листов
Н.контр.					9
Чтв.					1
Плата печатная гибко-жесткая					
Копировал					Формат А4

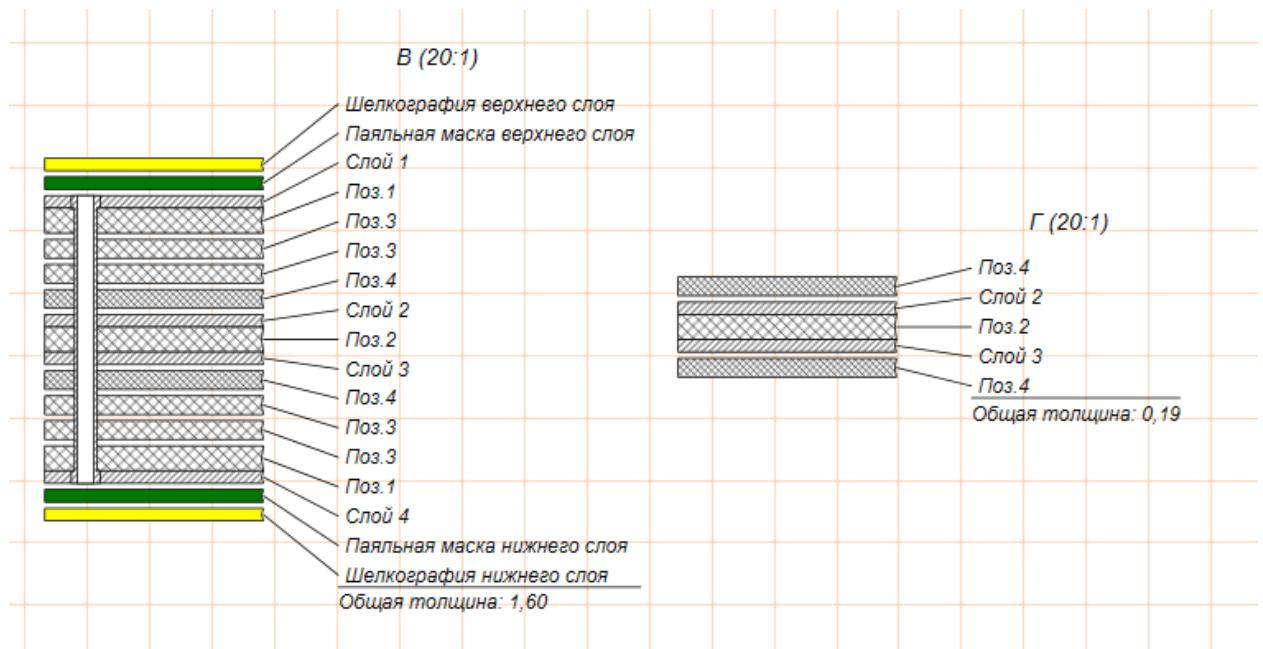
В сборочном чертеже на гибко-жесткую печатную плату на основном виде нужно указать жесткие и гибкие зоны, а также привести расшифровки стеков этих частей. В ТТ также нужно привести соответствующие пункты, относящиеся отдельно к жестким и гибким частям. Формулировки пунктов (в примере пп.7..12) могут быть довольно произвольными, главное, однозначными.

- 1 Размеры для справок
- 2 Общие допуски по ГОСТ 30893.1-2002:  $H12$ ,  $h12$ ,  $IT\ 12/2$
- 3 Неуказанные предельные отклонения размеров между осями двух любых отверстий  $\pm 0,1\text{мм}$
- 4 Смещение центра metallизированного отверстия относительно центра контактной площадки не более  $0,1\text{мм}$
- 5 Плата должна соответствовать ГОСТ 23752-79, группа жесткости 3. Класс точности 5 по ГОСТ Р 53429-2009
- 6 Проводящий рисунок на плате выполнить в соответствии с данными проектирования МПСУ.687281.024Д1 и данными конструкции МПСУ.687281.024Т5М
- 7 Контуры жестких участков показаны в зонах А
- 8 Контуры гибких участков показаны в зонах Б
- 9 Шероховатость обрабатываемой поверхности  $Rz40$
- 10 Финишное покрытие жестких участков печатной платы О-Н(68)3 Зл-Ко(99,5)0,25
- 11 Паяльная маска жестких участков печатной платы по технологии изготовителя, цвет - зеленый
- 12 Защитное покрытие гибких участков печатной платы покрывной защитной пленкой поз.5
- 13 Цвет шелкографии - белый

Основной вид приводится в развернутом виде с указанием зон стеков.



Для указания стека с помощью Layer Stack Legend сделаем два местных разреза, В и Г. Выбор субстека определяется по выпадающему списку Source. Материалы, имеющие позицию в спецификации на печатную плату, будем указывать номером позиции. К сожалению, по непонятной причине слой покрывной пленки в стеке гибкой части не показывается, вместо него почему-то отображается слой паяльной маски жесткой части. Поэтому покрывную пленку вынесли в ТТ п.12.

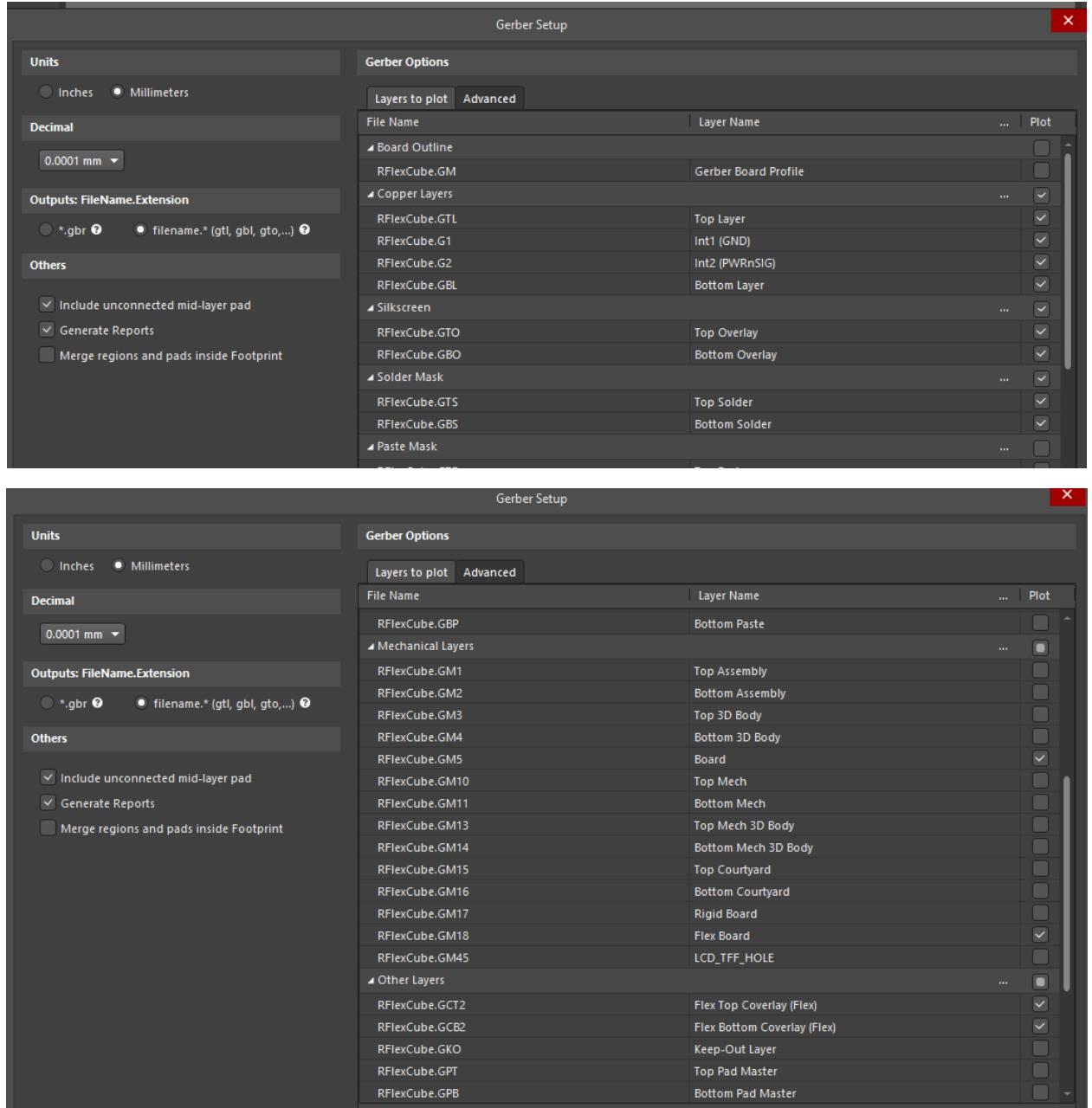


В Draftsman есть сущность Board Region View, которая настраиваемой графикой (стилем заливки/штриховки в группе Properties) показывает жесткие и гибкие зоны, а также позволяет выноскам автоматически прицепиться к соответствующей зоне и отобразить ее имя из редактора стека (по умолчанию, это «Rigid» или «Flex»). У выноски должен стоять режим информации Board Region. Но этот вид не всегда можно полностью настроить под требования ЕСКД, например, он не умеет показывать отверстия.

Перед экспортом герберов нужно обновить контура печатной платы и ее зон. В слое Board M5 должен быть полный внешний контур печатной платы плюс геометрию внутренних вырезов BoardCutout-ов. В слое M17 Rigid Board должны быть контура жестких частей, в слое M18 Flex Board – контура гибких частей.

При экспорте герберов (данных конструкции, Т5М) кроме слоев с металлизацией, паяльной маски, шелкографии, контура печатной платы и файлов сверловки, еще нужно экспортировать слои с контуром гибкой части (Flex Board) и слои с покрывной маской (Top и Bottom Flex Overlay). Слой с

контурами жестких частей (Rigid Board) экспортировать необязательно, он производителем выводится из общего контура печатной платы.



Соответственно, в данных проектирования Д1 необходимо расписать назначение файлов герберов и файлов сверловки.

МПСУ.687281.024Д1

Гаряч. примен.  
МПСУ.687281.024

Справ. №

Подл. и дата

Взам. инв. №  
Инв. № подл.

Подл. и дата

Инв. № подл.

Файл	МПСУ.687281.024Т5М.7z
<i>Источник Altium Designer</i>	
<i>Формат Gerber mm, 4:4, RS-274X</i>	
Слой	Имя файла
Шелкография верхнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GTO
Паяльная маска верхнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GTS
Металлизация верхнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GTL
Металлизация первого внутреннего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.G1
Металлизация второго внутреннего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.G2
Металлизация нижнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GBL
Паяльная маска нижнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GBS
Шелкография нижнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GBO
Контур платы	МПСУ.687281.024Т5М.GM5
Контур гибкой части	МПСУ.687281.024Т5М.GM18
Покрывающая пленка верхнего слоя гибкой части	МПСУ.687281.024Т5М.GCT2
Покрывающая пленка нижнего слоя гибкой части	МПСУ.687281.024Т5М.GCB2
<i>Формат mm, 4:4</i>	
Сквозные металлизированные отверстия	МПСУ.687281.024Т5М-plated.txt
Сквозные неметаллизированные отверстия	МПСУ.687281.024Т5М-Nonplated.txt
Сквозные металлизированные слотовые отверстия	МПСУ.687281.024Т5М-Slot-plated.txt
Сквозные неметаллизированные слотовые отверстия	МПСУ.687281.024Т5М-Slot-Nonplated.txt

МПСУ.687281.024Д1

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Иванов			
Проверил	Приходько			
Т. контр.				
Зам/Дир	Лялин			
Н. контр.				
Утв.				

Плата печатная гибко-жесткая

Данные проектирования

Лист.	Масса	Масштаб
у		
Лист	Листов	1

Кодировани

Формат А4

Данный комплект конструкторской документации приведен только для описания готовой гибко-жесткой печатной платы. Иногда необходимо описать гибко-жесткую печатную плату, расположенную в панели. В этом случае, сборочный чертеж на печатную плату становится несколько сложнее, с указанием всей панели, профиля фрезеровки и геометрии перемычек до основной панели.

## Литература

1. Лопаткин, А. Проектирование печатных плат в Altium Designer. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : ДМК Пресс, 2016. — 400 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/93565>
2. Суходольский В.Ю. Altium Designer: сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах: учеб. Пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 560 с.
3. Желобаев А.Л. Методические указания к лабораторным работам по курсу «САПР Altium Designer»: М.:МИЭТ, 2019 – 104с.
4. Приходько Д.В., Айрапетян А.А. Учебно-методическое пособие по работе с библиотеками в Altium Designer: учеб. Пособие. М.: МИЭТ, 2022 – 180 с.

### ***Перечень ресурсов сети «Интернет»***

5. Репозиторий автора с учебной библиотекой  
<https://github.com/dee3mon/StudentsLibraryGIT>
6. Репозиторий автора с учебными материалами по Altium Designer  
<https://github.com/dee3mon/altium-methodic>
7. Репозиторий автора с шаблонами для Altium Designer  
<https://github.com/dee3mon/altium-templates>
8. Онлайн-документация Altium Designer, раздел Designing a Rigid-Flex PCB <https://www.altium.com/documentation/altium-designer/designing-rigid-flex-pcb>
9. Тематический форум electronix.ru, раздел «Разрабатываем ПП в САПР - PCB development», <https://electronix.ru/forum/index.php?showforum=17>, доступно после свободной регистрации
10. Сайт Eurointech, раздел «Учебные материалы»  
<http://www.eurointech.ru/education/selftraining/>
11. Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов ОК 012-93 <http://classinform.ru/ok-eskd/kod>
12. Раздел «Гибко-жесткие печатные платы» базы знаний ООО «Резонит»  
<https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/gibko-zhestkie-pechatnye-platy/>

13. Раздел «Технологические возможности/ Стандартные гибко-жесткие печатные платы» ООО «Резонит» <https://www.rezonit.ru/pcb/gibko-zhestkie/serial/>

14. Микроконтроллер STMicroelectronics STM32F103RBT6  
<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103rb.html>

15. FPC-разъем Molex 503480-1000 <https://www.molex.com/en-us/products/part-detail/5034801000>

16. Модуль контроля подсветки светодиодов Texas Instruments TPS61160DRV <https://www.ti.com/product/TPS61161>

17. Белый светодиод Vishay VLMW1300  
<https://www.vishay.com/en/product/82435/>

18. Вертикальный USB-C разъем Molex 217182-0001  
<https://www.molex.com/en-us/products/part-detail/2171820001>

19. Шлейф-зонд Tag-Connect TC2030-CTX-NL-STDC14 <https://www.tag-connect.com/product/tc2030-ctx-6-pin-cable-for-arm-cortex>

20. Программатор STMicroelectronics STLINK-V3  
<https://www.st.com/en/development-tools/stlink-v3set.html>

21. Контроллер зарядки и питания Analog Devices LTC4067EDE  
<https://www.analog.com/en/products/ltc4067.html>

22. Разъем Molex 53398-4003 <https://www.molex.com/en-us/products/part-detail/533984003>

23. Полиимидная пленка DuPont AP 8545R  
<https://www.dupont.com/electronics-industrial/pyralux-ap.html>

24. Пленки серии Pyralux LF <https://www.dupont.com/electronics-industrial/pyralux-lf.html>

25. Стеклотекстолит FR-4 Tg170  
[https://www.rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/KB-6167\\_H1170.pdf](https://www.rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/KB-6167_H1170.pdf)

### ***Каналы Youtube с видеоуроками по Altium Designer***

26. Официальный канал Altium Designer  
<https://www.youtube.com/channel/UCpCi8Hpe4nIg4qvy2vpCGNQ>

27. Канал Алексея Сабунина  
<https://www.youtube.com/user/SabuninAlexey>
28. Плейлист «Altium Designer» на канале Сергея Булавинова  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLgUwXvgNkHQJ3G5UoLGMfHJM2cm4Afdx>
29. Канал официального представительства Altium Russia  
[https://www.youtube.com/channel/UCvZ\\_kyV4ATrQfjmtVpuj0LQ](https://www.youtube.com/channel/UCvZ_kyV4ATrQfjmtVpuj0LQ)
30. Плейлист «Altium Designer» на канале консультационного центра АМКАД <https://www.youtube.com/watch?v=PcStOG7sRqk&list=PLUk9KaCJSP-UAcH1uLu6mOQmDTmZGCND8>
31. Канал Robert Feranec - автора образовательного сообщества Fedevol Academy <https://www.youtube.com/user/matarofe/featured>

**Разработчик:**

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.