

УДК 629.735

И. М. ТАРАНЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛ-КОМПОЗИТ

Проведено сравнение технологичности изготовления металлических деталей из нержавеющей стали, титановых и алюминиевых сплавов в соединениях типа металл-композит различными методами. Для изготовления микроштифтов предполагается использовать такие методы как механическое или электрохимическое фрезерование, присоединение штифтов к детали с помощью сварки, а также запрессовку штифтов в заранее изготовленные отверстия. Численно оценена трудоемкость изготовления металлического соединительного элемента типа “канцелярская кнопка” и микроштифт. Разработаны рекомендации по выбору наиболее рациональных технологий изготовления металлических деталей для соединений металл-композит.

Ключевые слова: соединения металл-композит, технологичность, микроштифты, механообработка, показатели качества.

Введение

Проблема создания соединения деталей из композиционных материалов (КМ) или соединения с металлическими деталями является наиболее сложной и часто наиболее критической в процессе разработки узлов и элементов конструкций аэрокосмической техники. Это определяется различными факторами, среди которых можно отметить:

- относительно низкую прочность склеивающих составов по сравнению с прочностью армирующих материалов;
- разные значения коэффициентов линейного температурного расширения соединяемых элементов;
- нарушение регулярного потока усилий, действующих в области соединения;
- разную адгезию склеиваемого материала к поверхностям элементов соединения, возможную химическую или электрохимическую коррозию места соединения, нестабильностью зазоров в пределах допуска между соединительными поверхностями и др.

К соединениям предъявляются жесткие требования по их массе, надежности, статической и усталостной прочности и др.

В настоящее время для выполнения этих требований ряд авторов [1] предлагают усиливать места соединений трансверсальными (установленными в поперечном к плоскости соединения направлении) элементами – микроштифтами.

Постановка задачи

Рассматривая большое количество видов соединительных участков деталей, вариантов конст-

руктивно-технологических решений соединений, можно выделить 4 основных способа, довольно сильно отличающихся технологией образования трансверсальных элементов:

1. Образование трансверсальных элементов из слоя материалов одного из соединительных элементов.
2. Установка микроштифтов при сборке в заранее выполненные отверстия в сопрягаемых деталях и последующая полимеризация или склеивание.
3. Предварительная установка микроштифтов в один или два фитинга и вдавливание их в пакет препрега при сборке и совместной полимеризации. Несущими микроштифтами могут служить головки болтов, шайбы, торцы гаек и др.
4. Установка и закрепление промежуточного элемента с элементами зацепления, например, типа “канцелярская кнопка”, вдавливание его в слой препрега и последующая полимеризация.

Задавая несущую способность соединительных элементов, принимая одинаковыми для всех типов соединений величины их сопротивления срезу и смятию, рассмотрим технологические особенности их изготовления.

Общими для всех вариантов являются материалы соединительных элементов, которыми могут быть титановые сплавы, нержавеющие стали и другие сплавы, являющиеся относительно электрохимически инертными к материалам волокон и связующих, и обеспечивающие достаточный уровень адгезии к указанным материалам. Размеры и шаг расположения трансверсальных элементов рассчитываются по известной методике [1]. Их форма выбирается, исходя из технологии их получения, установки и особенностей распределения усилий в стыковой зоне.

Для разработки практических рекомендаций для выбора метода изготовления микроштифтов и их внедрения в соединяемые детали следует подробнее оценить технологические особенности получения трансверсальных элементов. Это является целью исследований, приведенных в данной статье.

Способ монолитных штифтов. При этом способе трансверсальные элементы (шпиги) образуют из монолита одного из соединительных элементов удалением лишнего материала (рис. 1). Шпиги могут располагаться порядно и в шахматном порядке. Форма из поперечного сечения может быть квадратной, ромбической, трехгранной.

Отличительной особенностью образования таких шпигов является достаточно малый коэффициент использования материала. Например, КИМ образования шпигов высотой 5 мм, углом при вершине 20° и шагом 7,5 мм равен 1,85%. Уменьшение шага расположения шпигов приводит к повышению КИМ, но увеличивает трудоемкость их обработки.

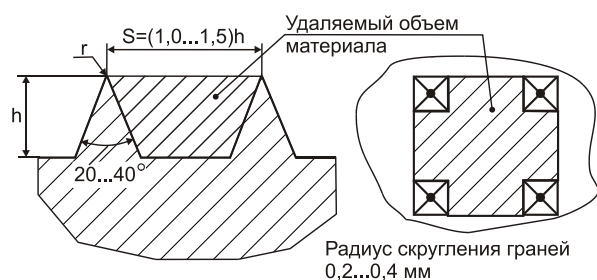


Рис. 1. Схема образования шпигов

Варианты использования законцовок с шпигами показаны на рис. 2.

Верхний и нижний варианты соединения, показанные на рис. 2, а, являются наиболее предпочтительными, так как шпиги выполняются на наружной поверхности детали и есть пространство для выхода режущего инструмента. Средний вариант менее предпочтителен: формообразование крайних рядов шпигов затруднено. Образование шпигов на наружных поверхностях законцовок можно представить не-

сколькими способами (табл. 2, 3, 4):

- фрезерование пазов по взаимно пересекающимся направлениям;
- закрепление на поверхности микроштифтов цилиндрической, конической и других форм с помощью сварки, пайки или запрессовки в выполненные отверстия;
- получение шпигов с удалением лишнего материала разными способами электрофизической обработки;
- химическим или электрохимическим фрезерованием.

Два последних способа малопродуктивны, при их осуществлении скорость съема металла с поверхности составляет $0,3...0,7$ мм/час. Преимущества и недостатки первых двух способов можно определить с помощью квалитетического анализа.

Реализация установки микроштифтов при сборке показана на рис. 3.

Держатель имитаторов и оснастка выполняют роль инструмента для формования отверстий. Имитаторы, внедряясь между слоями препрега, раздвигают армирующие волокна и увеличивают плотность их расположения вокруг отверстия. Этим несколько увеличивается прочность КМ вокруг отверстия. Однако разные термические деформации держателя, оснастки и полимеризуемой детали приводят к искажению межцентровых расстояний и формы отверстия. Полученные этим способом отверстия можно использовать как направляющие для получения отверстий под винты и заклепки.

Вариант выполнения соединений с помощью микроштифтов. Схематично его последовательность показана на рис. 4. В двух металлических законцовках устанавливаются микроштифты, закрепляемые на их поверхности с помощью сварки или в отверстия с натягом (рис. 5), а также наплавлением с помощью лазера металлического порошка.

Законцовки сжимают, микроштифты пронзают слой препрега. Вся эта структура полимеризуется под давлением.

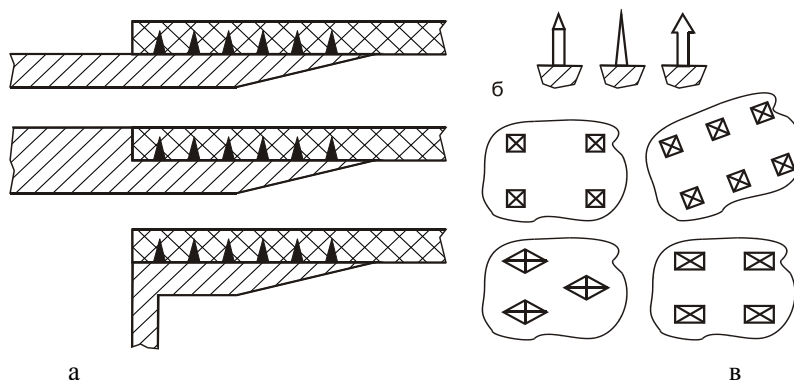


Рис. 2. Примеры реализации законцовок с шпигами в металло-композитных соединениях:

а – схема внедрения штифтов в композит; б – формы поперечного сечения штифтов; в – возможные схемы расположения штифтов в плане

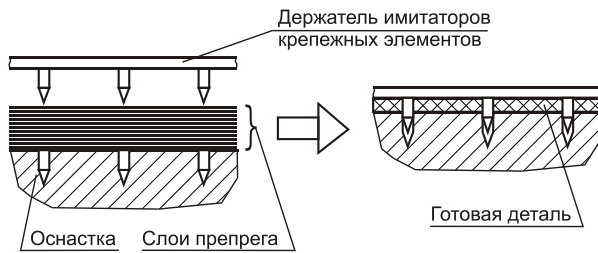


Рис. 3. Схема техпроцесса формовки отверстий в слоистых КИМ [1]

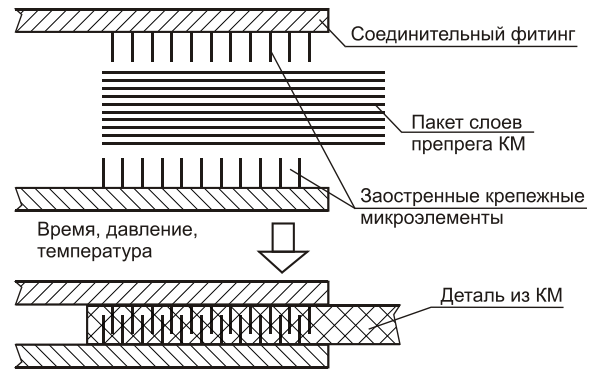


Рис. 4. Схемы выполнения соединения с использованием микроштифтов [1]

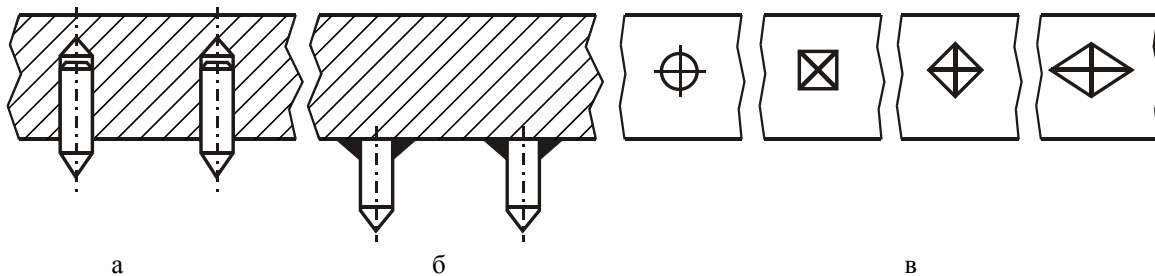


Рис. 5. Варианты закрепления микроштифтов:

а – в отверстия с натягом; б – сваркой встык; в – форма микроштифтов в плане [1]

Материалами законцовок могут быть легированная сталь, титановые, алюминиевые сплавы. Для каждого материала может быть предпочтителен один из вариантов закрепления микроштифтов. Например, в связи с плохой обрабатываемостью резанием титановых сплавов может быть предпочтителен вариант стыковой электросварки в среде аргона. Продольная форма микроштифтов может быть цилиндрической, конической, пирамидальной. С одного конца эти элементы должны быть заострены с радиусом скругления равным 2...3 диаметрам волокна, а другой – плоский торец или с некоторой пяткой. Такая форма достаточно просто формируется на высадочных станках-автоматах с высокой производительностью. Диаметр микроштифтов находится в диапазоне 1...2 мм, а в сильнонагруженных соединениях может достигать 3...4 мм. Длина штифта 5...7 мм, а шаг их расположения равен 1,5 длинам штифта. В одностороннем соединении может находиться 1000...2000 штифтов.

Вариант соединения с элементами типа “канцелярская кнопка” показан на рис. 6. В этом варианте между слоистым материалом и металлическим элементом помещается промежуточная деталь с надрезанными и отогнутыми выступами клиновидной формы. Толщина этого элемента 0,2...0,5 мм.

К металлической детали он крепится болтами или сваркой. Клиновые отгибы вдавливаются в слоистый материал и полимеризуются в нем (рис. 7). Варианты крепления головок болтов, гаек и шайб

к детали из КИМ показаны на рис. 8.

Предположим, что по несущей способности все перечисленные варианты равноценны и отличаются технологическими особенностями изготовления. При их выполнении могут использоваться техпроцессы: механической или электрофизической обработки для получения шипов и отверстий для запрессовки микроштифтов, сварки для установки микроштифтов на металлических законцовках, вырубки или вырезки клиновидных отгибов на промежуточных элементах в штампах или лазерной резки и ряд других процессов. Все они отличаются трудоемкостью (производительностью), стоимостью применяемой технологической оснастки и оборудования, величиной КИМ. Для выявления предпочтительного варианта (или нескольких вариантов) необходимо провести квалиметрический анализ вариантов соединений. Для его осуществления необходимы статистические данные по применяемым техпроцессам. Такие данные приведены в таблице 1.

Рассмотрим условно типовой элемент плоской законцовки размерами 50x100 мм и толщиной 5 мм. Схема соединения двух таких законцовок с композитным слоистым элементом толщиной 7 мм показана на рис. 9.

Трансверсальные элементы (шпильки, штифты) установлены рядами с шагом 7,5 мм. Их высота равна 5 мм. Общее количество – 84 элемента. Материалы: алюминиевый сплав, нержавеющая сталь, титановый сплав.

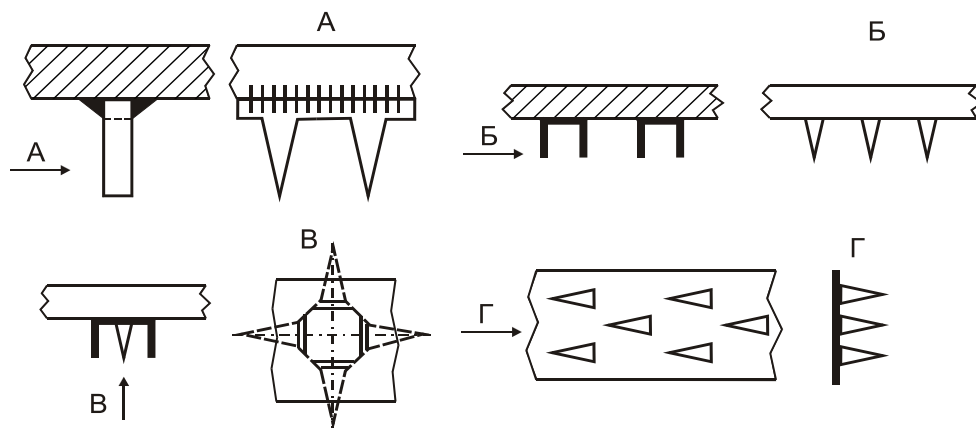


Рис. 6. Формы промежуточных крепежных элементов [1]

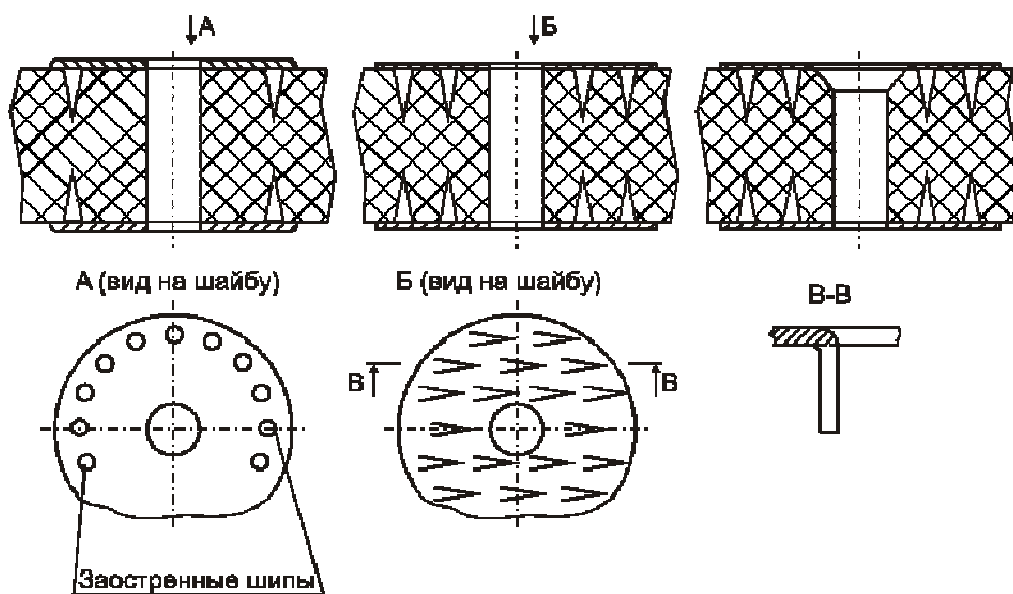


Рис. 7. Внедрения острия кнопок в композит с последующей полимеризацией

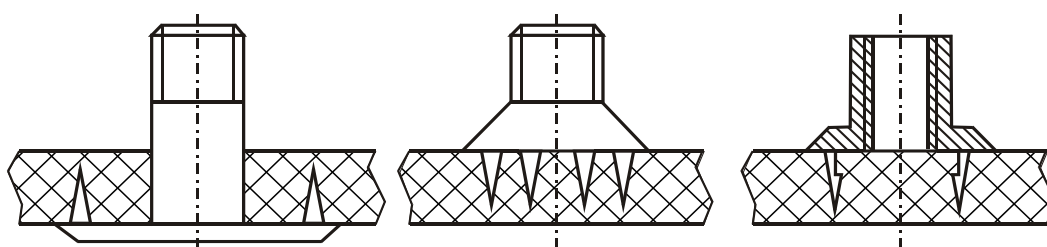


Рис. 8. Специальные болты и гайки, заформованные в КМ [1]

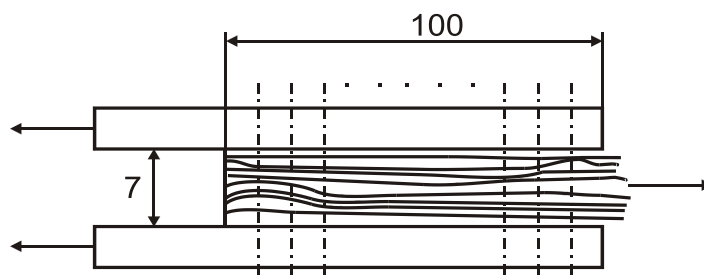


Рис. 9. Схема рассматриваемого соединения (пунктирными линиями обозначены оси трансверсальных элементов)

Таблица 1

Данные для квалитетического анализа

Параметр	Алюминиевые сплавы	Легированные и нелегированные стали	Титановые сплавы	Источник
Скорость фрезерования канавок торцовыми и дисковыми фрезами с металлокерамикой, м/мм	250...350	100...160	80...150	2, 3
Глубина резания, мм	2...4	1,0...2,0	0,5...1,0	2, 3
Подача при фрезеровании, мм/зуб	1,0...2,0	0,5...1,0	<0,5	2, 3
Скорость резания при сверлении отверстий малого диаметра, м/мин	10...24	6...18	5...18	2, 4
Подача, мм/об	0,02...0,05	0,02...0,05	0,02...0,05	2
Точность, квалитет	12-13	12-13	12-13	
Шероховатость поверхности, Ra	6,3...15	6,3...15	6,3...15	2
Электрохимическая прошивка отверстий: производительность, мм ³ /мин	до 30000	10000...20000	3000	6
удельный расход энергии, кВт·ч/кг	5...35	5...35		5
Электроэрозионная прошивка отверстий: производительность, мм ³ /мин	200...1500	1000...1500	1000...1500	5
удельный расход энергии, кВт·ч/кг	50...100	40...60	7,5...10	5
Электроэрозионная размерная обработка канавок: производительность, мм ³ /мин	20...200	11...120	8...40	5
удельный расход энергии, кВт·ч/кг	–	7,5·10 ³	(3...7,5)·10 ³	6
Шероховатость, Ra	–	0,32...2,5	0,32...2,5	6
Электрохимическое фрезерование (заострение кромок): производительность, мм ³ /мин	7000...10000	7000...10000	7000...10000	6
Анодно-механическая резка: производительность, мм ³ /мин	–	2000...6000	10...2000	5
удельный расход энергии, кВт·ч/кг	–	(5...7,5)·10 ³	(5...7,5)·10 ³	6
Шероховатость, Rz	–	20...80	20...80	5
Лазерная резка: Скорость резания, мм/мин	–	1400...2100	1400...2100	11
Точность размеров, мм	–	~ 0,2	~ 0,2	11
Высота микроштифтов, мм	8...10 на 1000 деталей			

Таблица 2

Расчет длительности фрезерования канавок между шипами торцевой и дисковой фрезами с металлокерамическими пластинами

Расчетные параметры	Алюминиевый сплав	Нержавеющая сталь	Титановый сплав
Количество оборотов фрезы, $n=1000V_p/(\pi D)$, об/мин			
Торцевая фреза $\varnothing 8$ мм	9950	3980	3180
Дисковая фреза $\varnothing 12$ мм	663	265	212
Минутная подача $S_m = S_z \cdot z \cdot n$, м/мин			
Торцевая фреза, $z=2$ зуба	19900	3980	1908
Дисковая фреза, $z=18$ зубьев	11934	2305	1145
Количество проходов по глубине, шт	3	5	8
Общая длина канавок с учетом врезания и перебега, мм			
Для торцевой фрезы	1450	1450	1450
Для дисковой фрезы	1500	1500	1500
Машинное время одного прохода, мин			
Для торцевой фрезы	0,073	0,364	0,760
Для дисковой фрезы	0,126	0,651	1,31

Продолжение табл. 2

Расчетные параметры	Алюминиевый сплав	Нержавеющая сталь	Титановый сплав
Машинное время для фрезерования шипа по высоте, мин			
Торцевой фрезой	0,219	1,82	6,08
Дисковой фрезой	0,378	3,26	10,48
Операционное время, $t_M + t_{вст}$, мин	0,328	2,79	9,12
Расход энергии, Дж	0,567	4,89	15,72
Торцевой фрезой	109	156	187
Дисковой фрезой	270	300	360

Примечание: в связи с ажурностью работы выбирались менее жесткие режимы обработки. Организационно-техническое время не учитывается в связи с его равенством по вариантам техпроцессов.

Таблица 3

Сравнение трудоемкостей формирования шипов электроэрозионной и анодно-механической обработками

Расчетные параметры	Алюминиевый сплав	Нержавеющая сталь	Титановый сплав
Общий удаляемый объем $218,25 \text{ мм}^3 \times 7 = 1526 \text{ мм}^3$; Длина канавки вдоль 100 мм; Длина канавки поперек 50 мм.			
Электроэрозионная обработка канавок перемещающимся электродом:			
машинное время, мин	2,18	3,35	5,45
расход энергии, Дж	–	$45,9 \cdot 10^6$	$10,7 \cdot 10^6$
Анодно-механическая резка канавок вращающимся инструментом:			
машинное время, мин	–	26	26
вспомогательное время для переустановки, мин		7,2	3,6
операционное время, мин		33,2	29,6
расход энергии, Дж		$9,36 \cdot 10^6$	$9,36 \cdot 10^6$

В результате расчета получено, что обрабатывать и получать шипы на поверхности заготовки для всех рассматриваемых материалов по затратам времени предпочтительнее торцевой фрезой, при этом операционное время меньше в среднем в 1,7 раза. При этом меньше необходимое пространство для входа и выхода фрезы, а также нагрузка на обрабатываемый шип. Организационно-техническое время для обоих вариантов приблизительно равно. По затратам энергии торцевое фрезерование тоже предпочтительнее.

Удаление заусенцев и скругление острых кромок предпочтительнее проводить электрохимической обработкой, которая достаточно производительна ($7000 \dots 10000 \text{ мм}^3/\text{мин}$).

Использование электроэрозионной и анодно-механической обработки не выгодно по параметрам трудоемкости и затрачиваемой энергии для фрезерования шипов на законцовках из алюминиевых сплавов. Однако электроэрозионная обработка шипов из титановых сплавов менее трудоемка, чем фрезерование почти в 1,67 раза. Такая обработка достаточно затратна по параметру потребляемой энергии (превышение на 5 порядков). Электроэро-

зионная обработка отличается минимальным силовым воздействием на обрабатываемый материал, не требует в большинстве случаев последующей стабилизирующей термообработки. Используемое оборудование по сложности сопоставимо с оборудованием для механической обработки. При дальнейшем квалитетном анализе следует принимать такой вариант.

При обработке отверстий для запрессовки микроштифтов наблюдается подобная тенденция: для алюминиевых сплавов и нержавеющей стали приоритетной является механическая обработка, для титановых сплавов – электрохимическая или электроэрозионная прошивки. Снижение трудоемкости обработки в 8,0 и 2,7 раза соответственно. При этом расчете не учтен еще один фактор – необходимость термообработки после сверления, которую нужно проводить в нейтральной газовой среде или в вакууме. В противном случае нужна очистка поверхности отверстия от окислов. А это увеличивает трудоемкость изготовления отверстий в 2...3 раза. Электрохимическая или электроэрозионная обработки более надежны с точки зрения поломки и за-

ствования в отверстия сверла.

С точки зрения удельного расхода энергии эти способы более энергозатратны, но общие затраты энергии достаточно малы.

Точность размеров и шероховатость поверхности отверстий получаемых этими способами вполне удовлетворительны для запрессовки микроштифтов (см. табл. 1).

Учитывая вышеизложенное, для заключительного квалитетического анализа следует принять вариант электрохимической прошивки отверстий.

Расчетные значения трудоемкости и энергозатрат при изготовлении промежуточного элемента типа “канцелярская кнопка”, а также установке микроштифтов приведены в таблице 5.

Таблица 4
Сравнение трудоемкости изготовления отверстий для микроштифтов (168 отверстий)

Расчетные параметры	Алюминиевый сплав	Нержавеющая сталь	Титановый сплав
Диаметр отверстий 1,0 мм, глубина отверстий 2,0 мм			
Сверление отверстий			
Количество оборотов	7643	3822	1592
$N=(1000V_p)/\pi D$, об/мин	3822	1911	318
Минутная подача, мм/мин			
Машинное время $(2\text{ мм}/S_M) \cdot 84\text{ отв}$, мин	0,628	0,087	0,528
Электрохимическая прошивка отверстий (последовательно):			
трудоемкость (на 84 отверстия), мин	0,044	0,088	0,066
расход энергии, Дж	$565 \cdot 10^3$	$1836 \cdot 10^3$	$1059 \cdot 10^3$
Электроэрозионная прошивка отверстий:			
трудоемкость (на 84 отверстия), мин	0,088	0,264	0,198
расход энергии, Дж	$890 \cdot 10^3$	$1650 \cdot 10^3$	$1690 \cdot 10^3$

Таблица 5
Сравнение трудоемкостей изготовления трансверсальных элементов

Расчетные параметры	Микроштифты	Элемент типа “канцелярская кнопка”	Источник
Габаритные размеры пластины 100x50 мм Количество трансверсальных элементов – 84 шт. (шаг 7,5 мм)			
Лазерная резка промежуточного элемента с отогнутыми трансверсальными элементами (84 шт):			
Периметр элемента 300 мм			
Периметр зубцов 1176 мм			
Всего 1476 мм			
Длительность резки, мин	–	1,05	7, 8, 9
Вспомогательное время, мин	–	1,15	10, 12
Длительностьгиба зубьев, мин	–	1,0	9, 12
Длительность точечной сварки, мин	–	2,0	12
Итого, мин	–	5,2	–
Гибка язычков в штампе, мин		0,15	12
Соединение промежуточного элемента с основной деталью, мин			собственная ин-формация
Точечной сваркой	–	2,2	
Механическое		2,5...3,5	
Запрессовка микроштифтов в законцовку, мин	1,4	–	9, 10, 12
Стыковая сварки микроштифтов к законцовке, мин	3,0	–	12
Вспомогательное время запрессовки и сварки, мин	3,5	–	собств. инф.

Результаты

Соединение микроштифтов с законцовкой может быть осуществлено запрессовкой в отверстия или

стыковой сваркой к поверхности законцовки. В большинстве случаев использования законцовок из алюминиевых сплавов стыковая сварка микроштифтов из стали или титановых сплавов затруднена. Поэтому следует рассматривать вариант запрессовки.

Стыковая сварка микроштифтов и законцовок из нержавеющей стали или титановых сплавов более трудоемка (примерно в 1,3 раза, см. табл. 5) и по сложности процесса превышает процесс запрессовки.

Окончательные расчетные значения трудоемкости и затрат энергии для рассматриваемых типов соединений металл-композит представлены в табл. 6.

Выводы

В качестве выводов по результатам проведенного исследования следует отметить следующее: минимальных затрат времени и энергии требует соединение с шипами, получаемыми торцевым фрезерованием за исключением законцовок из титановых сплавов. Для них предпочтителен метод запрессовки микроштифтов (сокращение трудоемкости в 1,1 раза).

Использование для соединения промежуточного элемента типа “канцелярская кнопка” в сравниваемой среде показателей имеет наибольшую трудоемкость. Однако она решающим образом определяется трудоемкостью закрепления такого элемента на поверхности детали (рассмотрена точечная сварка и механическое закрепление винтами). Существенно снизить трудоемкость такого конструктивно-технологического решения можно с помощью микроштифтов, соединяющих промежуточный элемент с основной деталью. Схематично технологический процесс может состоять из следующих операций:

- лазерной резки по контуру элемента и надрезания язычков;
- гибки язычков в простом гибочном штампе;
- электрохимической зачистке заусенцев;
- установки (закрепления) промежуточного элемента с основной деталью зачеканенными микроштифтами.

Таким образом, оценочный анализ вариантов конструкций и технологий изготовления соединений металл-композит позволяет выбрать оптимальные решения в среде выбранных параметров.

Безусловно, приведенная оценка ресурсозатрат несет относительный характер. В них использованы максимальные (наибольшие) значения производительности различных методов обработки материалов, приведенных в справочниках.

При расчетах трудоемкости изготовления микроштифтов фрезерованием не учитывалась повышенная трудоемкость их формообразования, связанная с необходимостью получения острых вершин пирамидальных штифтов. А это требует чрезвычайно легких режимов резания, что можно обеспечить только за несколько проходов.

Остается открытым вопрос скругления ребер пирамидальных элементов до значений 0,3...0,5 мм при острых вершинах пирамиды.

Важен полученный вывод о том, что тщательно подобранная технология изготовления трансверсальных элементов позволяет изготавливать серийно способные и экономически оправданные соединения металл-композит.

Таблица 6

Сравнение показателей технологичности соединений единичных образцов (металл-КМ).
Размер образцов 50x100 мм

Параметры технологичности для методов изготовления	Виды соединений								
	Соединение посредством образованных шипов			Соединение с помощью микроштифтов			Соединение с промежуточным элементом типа “канцелярская кнопка”		
	Al-сплав	Нержавеющая сталь	Ti-сплав	Al-сплав	Нержавеющая сталь	Ti-сплав	Al-сплав	Нержавеющая сталь	Ti-сплав
Трудоемкость формообразования трансверсального элемента, мин	2,18	3,35	5,45	4,95	4,99	4,98	7,95	7,55	7,55
Расход энергии, кДж	0,109	0,156	0,187	$890 \cdot 10^3$	1650	1690	–	–	–
Сложность применяемого оборудования	Используется серийное несложное оборудование						Используется весьма сложное серийное оборудование		
Потребность в специальных материалах	Медь, электролиты						Кислород, аргон		
Квалификация обслуживающего персонала, разряд	3-4						4-5		
Возможность автоматизации процесса	Средняя и выше средней						Высокая		

Литература

1. Карпов, Я. С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник [Текст] / Я. С. Карпов. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2010. – 768 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. [Текст] / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Меццеракова. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Ламм, М. М. Расчет режимов резания при фрезеровании : учеб. пособие по курсовому и дипломному проектир. [Текст] / М. М. Ламм. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1983. – 93 с.
4. Ламм, М. М. Методика расчета режимов резания для сверления [Текст] : учеб. пособ. / М. М. Ламм. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1982. – 84 с.
5. Попилов, Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов [Текст] / Л. Я. Попилов. – М. : Машиностроение, 1969. – 297 с.
6. Попилов, Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов [Текст]: справочник / Л. Я. Попилов. – М. : Машиностроение, 1982. – 400 с.
7. Техничко-экономическое сравнение различных методов обработки [Электронный ресурс] / E. Abele et al. – Режим доступа: <http://www.stankoinform.ru/article/newworking.htm>. – 5.12.2016 г.
8. Taranenko, I. M. Qualimetric analysis of structural-manufacturing solutions of articles for composite longitudinal load-carrying structures of aircrafts [Text] / I. M. Taranenko // *International Symposium on Sustainable Aviation-2016 (ISSA-2016)*, May 29 - June 1, 2016. – Istanbul, Turkey, 2016. – P. 58-61.
9. Pykh, Y. A. Environmental indices: systems analysis approach [Text] / Yuri A. Pykh, D. Eric Hyatt, Roman J. M. Lenz. – Volume I, EOLSS Publications, 19 sept. 2000. – 680 p.
10. Fabian, S. The set of methods for quantification and analysis of pressure die casting machines quality [Text] / S. Fabian // *Stanislav Fabian, Archives of Foundry*. – 2004. – Volume 4, Nr 11. – P. 128 - 133.
11. Головкин, Г. С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов [Текст] / Г. С. Головкин. – М. : Химия, Колос. С, 2007. – 399 с.
12. Общемашиностроительные нормативы времени на холодную штамповку, резку, высадку и обрезку. – М. : Экономика, 1987. – 189 с.

References

1. Karpov, Ya. S. *Proektyrovanye detaley y ahrehatov yz kompozytov* [Designing of articles and units of composites]. Kharkiv, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” Publ., 2010. 768 p.
2. Kosylova, A. H., Meshcheryakova, R. K. *Spravochnyk tekhnoloha-mashynostroytelya* [Technologist-engineer reference book]. Moscow, Mashynostroeny Publ., 1985, vol. 2. 496 p.
3. Lamm, M. M. *Raschet rezhymov rezanyya pry frezerovanyu* [Analysis of cutting regimes for milling]. Kharkiv, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” Publ., 1983. 93 p.
4. Lamm, M. M. *Metodyka rascheta rezhymov rezanyya dlya sverlenyya* [Method of analysis for cutting regimes at drilling]. Kharkiv, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” Publ., 1982. 84 p.
5. Popylov, L. Ya. *Elektrofyzicheskaya i elektrokhimicheskaya obrabotka materyalov* [Electro-physical and electro-chemical processing of materials]. Moscow, Mashynostroeny Publ., 1969. 297 p.
6. Popylov, L. Ya. *Elektrofyzicheskaya i elektrokhimicheskaya obrabotka materyalov* [Electro-physical and electro-chemical processing of materials]. Moscow, Mashynostroeny Publ., 1982. 400 p.
7. Abele, E. et al. *Tekhniko-ekonomycheskoe sravnenye razlychnykh metodov obrabotky* [Technical-economical comparison of different machining methods]. Available at: <http://www.stankoinform.ru/article/newworking.htm> (Accessed 5.12.2015).
8. Taranenko, I. M. Qualimetric analysis of structural-manufacturing solutions of articles for composite longitudinal load-carrying structures of aircrafts. *International Symposium on Sustainable Aviation-2016 (ISSA-2016)*, 2016, pp. 58-61.
9. Pykh, Y. A., Hyatt, D. Eric., Lenz, Roman J. M. Environmental indices: systems analysis approach. *EOLSS Publications*, 2000, vol. 1. 680 p.
10. Fabian, S. The set of methods for quantification and analysis of pressure die casting machines quality. *Archives of Foundry*, 2004, vol. 4, no. 11, pp. 128-133.
11. Holovkyn, H. S. *Proektyrovanye tekhnolohycheskykh protsessov yzhotovlenyya yzdeley yz polymernykh materyalov* [Tailoring of technological processes for manufacturing articles of polymers]. Moscow, Khymyya, Kolos. S Publ., 2007. 399 p.
12. *Obshchemashynostroytel'nye normatyvy vremeny na kholodnuyu shtampovku, rezku, vysadku i obrezku* [Common engineering time rates for cold forming, cutting, heading and trimming]. Moscow, Ekonomika Publ., 1987. 189 p.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ З'ЄДНАНЬ МЕТАЛ-КОМПОЗИТ

I. M. Taranenko

Проведено порівняння технологічності виготовлення металевих деталей з нержавіючої сталі, титанових і алюмінієвих сплавів у з'єднаннях типу метал-композит різними методами. Для виготовлення мікроштифтів передбачається використовувати такі методи як механічне або електрохімічне фрезерування, приєднання штифтів до деталі за допомогою зварювання, а також запресовування штифтів у заздалегідь виготовлені отвори. Чисельно оцінено трудомісткість виготовлення металевого сполучного елемента типу "канцелярська кнопка" і мікроштифт. Розроблено рекомендації з вибору найбільш раціональних технологій виготовлення металевих деталей для з'єднань метал-композит.

Ключові слова: з'єднання метал-композит, технологічність, мікроштифти, механічна обробка, показники якості.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURAL AND MANUFACTURING SOLUTIONS OF MEAL-COMPOSITE JOINTS

I. M. Taranenko

Comparison of manufacturability for production articles made of stainless steel, titanium alloys, aluminum alloys in different joints of metal and composites is conducted. For manufacturing of micropins it is considered to apply such methods as mechanical and electromechanical milling, welding of pins to an article and tight fit insertion of pins to previously drilled holes. The manufacturability of metal joining "push-pin" and micro-pin elements are estimated numerically. Recommendations for selection the most rational technologies for manufacturing metal articles for metal-composite joints are developed.

Key words: metal-composite joints, manufacturability, micro-pins, machining, quality indexes.

Тараненко Ігор Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедри композитних конструкцій і авіаційного матеріалознавства, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна, e-mail: igor.taranenko@khai.edu.

Taranenko Igor Michailovich – Candidate of Technical Science, Associate Professor of Dept. of Composite structures and Aviation Materials, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine, e-mail: igor.taranenko@khai.edu.