

# ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА

Е. В. Кривонос

Омский государственный технический университет  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

**В современных условиях при изготовлении вафельной обечайки для топливного бака обработки подкрепления выполняется фрезерованием на монолитной заготовке с применением специализированных станочных комплексов. При этом актуальным вопросом остается выбор схемы обработки вафельного фона: на плоской панели или на загнутой обечайке. Проблема выбора возникает из-за требований к точности изготовления вафельного фона. Важным является сохранение допуска массы детали и геометрического совершенства формы ячейки. Все это в целом влияет на восприятие расчетных нагрузок и грузоподъемность ракеты. При этом методы и процессы обработки вафельного фона должны быть производительны и экономически целесообразны. Цель работы: определить и обосновать схему фрезерования, при которой сохраняется геометрическая форма ячейки вафельного фона и обеспечивается допуск массы вафельной обечайки.**

**Предложенное обоснование позволит на старте проектирования новых перспективных изделий более точно определять технологические и производственные затраты, необходимые для производственного изготовления деталей с вафельным фоном с заданными параметрами и точностью.**

**Ключевые слова:** вафельная панель, вафельная обечайка, фрезерование вафельного фона, топливный бак ракеты, сплав АМГб.

## Введение

При изготовлении сухих и топливных отсеков [1] ракета-носителей (РН) обеспечение допуска массы является приоритетной задачей. На практике это обеспечивается внедрением облегченных материалов [2–3] наряду с оптимальной конструкцией подкрепляющего набора ребер (вафельного фона) ортотропных оболочек и вафельных обечаек [4–7], технология изготовления которых носит трудозатратный характер ввиду сложности обеспечения точности и совершенства формы ячейки вафельного фона [8].

В ракетостроении возможны следующие методы получения вафельного фона в конструкции деталей (табл. 1):

- клепаное взаимно ортогональное исполнение;
- химическое фрезерование;
- электроэрозионная и электрохимическая обработка (ЭЭО и ЭХО);
- обработка давлением (штамповка, раскатка);
- механическая лезвийная обработка (фрезерование).

По каждому из методов, на определенных исторических этапах, сложился опыт, определяющий его применение в производстве летательного аппарата, исходя из габаритов, параметров и назначения детали в конструкции изделия. Электрофизические методы трудоемки и энергоемки, особенно для крупногабаритных изделий. Химическое фрезерование применяют для формирования неглубоких конструктивных элементов, для доработки детали по массе или обеспечения точного значения толщины изделия. В материалах конференции [9]

предложена схема изготовления подкрепления на обечайке штамповкой на ротационно-раскатном станке. К сожалению, описание процесса и описание установки в материалах конференции не изложено, также не нашлось результатов практического применения данной технологии.

Для получения подкрепляющего набора на корпусе топливных и сухих отсеков РН преимущественно применяется фрезерование вафельного фона на цельной заготовке [10], в ее плоском или отформованном в оболочку виде. Идентичной особенностью и проблемой, для двух случаев фрезерования подкрепления на панели, является отсутствие жестких условий базирования заготовки. Крепление ограничивается рассредоточенной системой гидравлических или пневматических прижимов по контуру детали, без жесткой фиксации в центральной области обработки. В таких случаях требуется дорогостоящее специальное технологическое оборудование с адаптивными системами контроля процесса резания [11] или реализация методов обработки на основе баланса сил резания [12–17], исключающих деформацию заготовки в не жестко закрепленных местах. К тому же важным требованием остается сохранение допуска массы детали и совершенство геометрической формы обрабатываемых конструктивных элементов.

## Постановка задачи

При изготовлении сухих и топливных отсеков актуальным вопросом, с точки зрения снижения массы; повышения производительности и снижения стоимости фрезерования подкрепления; соответствия требованиям конструкторской документа-

Таблица 1. Метод изготовления подкрепляющего набора в обечайках  
Table 1. Method of production of reinforcing set in shells

№	Метод	≈ IT, мм	Ключевые недостатки
1	Клепка	± 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ низкая производительность</li> <li>➤ низкая точность</li> </ul>
2	Хим. фрезерование	± 1ч2	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ низкая производительность</li> <li>➤ низкая точность</li> <li>➤ сложность реализации процесса</li> <li>➤ низкая экологичность</li> </ul>
3	ЭЭО и ЭХО	± 0,05	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ низкая производительность</li> <li>➤ относительная высокая стоимость</li> <li>➤ сложность реализации процесса</li> </ul>
4	Штамповка, раскатка	± 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ сложная, дорогостоящая оснастка</li> <li>➤ сложность реализации процесса</li> </ul>
5	Фрезерование	± 0,2	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ сложная, дорогостоящая оснастка</li> <li>➤ трудно обеспечить сбалансированный процесс резания</li> </ul>

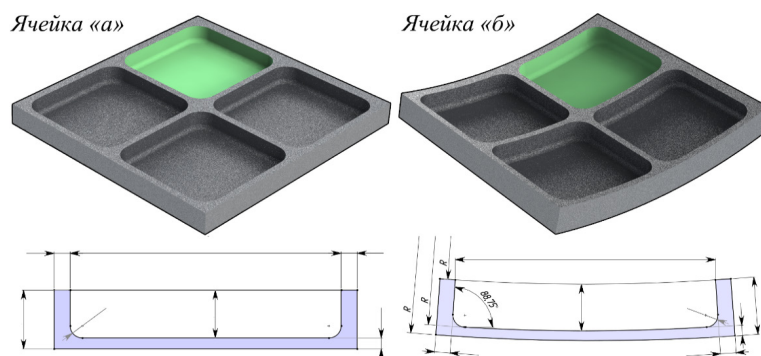


Рис. 1. Варианты исполнения ячеек детали с вафельным фоном:

а — на плоскости; б — на цилиндре

Fig. 1. Versions of part cells with waffle background:

a — on the plane; b — on the cylinder

ции; совершенства формы и качества поверхности ячеек; повышения стабильности процесса резания, остается выбор варианта исполнения ячеек подкрепления. Рассмотрим условно вырезанные ячейки вафельного фона в двух их представлениях (рис. 1):

1) на плоской образующей (фрезеровать на плоской панели → формовать в обечайку);

2) на цилиндрической образующей (формовать панель в обечайку → фрезеровать на обечайке).

Вариант «а» представляет собой стандартный конструктивный элемент в виде квадратного плоского кармана с взаимно перпендикулярным расположением стенок и параллельными дном и торцевой поверхностью. Обработка возможна на стандартном трехосевом оборудовании, пальцевыми фрезами, стратегиями плоского фрезерования. Вариант «б» представляет собой конструктивный элемент с фасонной поверхностью дна радиусом  $R$  и отклоненными от него стенками на угол  $88,75^\circ$ , тем самым формируют поднутрения (теневая зона обработки). Причем поднутрения формируются только на двух стенках в одной проекции вида. Обработка кармана в таком представлении, с сохранением конструкторских параметров, возможна на многокоординатном оборудовании, инструментом для объемного фрезерования, стратегиями наклонного и фасонного фрезерования. Любое упрощение формы ячейки «б», с целью сокращения затрат на специальное оборудование или сокращения времени обработки, приведет или к нарушению допуска массы изделия наряду с несовершенством формы

ячейки или критическому выходу за поле допуска размеров.

### Теория

Для обоснования варианта исполнения вафельного фона, с учетом реальных размеров и допусков ячеек «а» и «б», произведен анализ по двум параметрам:

- критерий оценки  $S$  расчетной массы панели  $M$  к совершенству фактической формы ячейки  $\Phi_{\text{ФАКТ}}$  после обработки, в эквиваленте ее объема  $V$ ;
- критерий производительности.

С точки зрения обеспечения размеров при фрезеровании, обработка ячейки «а» — стандартный случай. Невыполнение размеров и несоблюдение допусков приведет к нерасчетным критическим параметрам. Принципиально критерий  $S$  актуален только для варианта исполнения «б», когда с целью сокращения времени и стоимости обработки жертвуют ее формой, размерами и массой, косвенно принимая отклонения от конструкторской документации, в последующем согласовывая их.

Если деталь с вафельным фоном представить как набор разделенных элементов, то ячейки занимают  $\approx 95\%$  покрытия площади, в этом случае остальными конструктивными элементами допускается пренебречь или рассматривать отдельно. Например, для вафельной обечайки из сплава АМг6 для первой ступени ракеты «Ангара» массой  $M$  и числом ячеек  $n_j$  масса одной ячейки, в вырезанном представле-

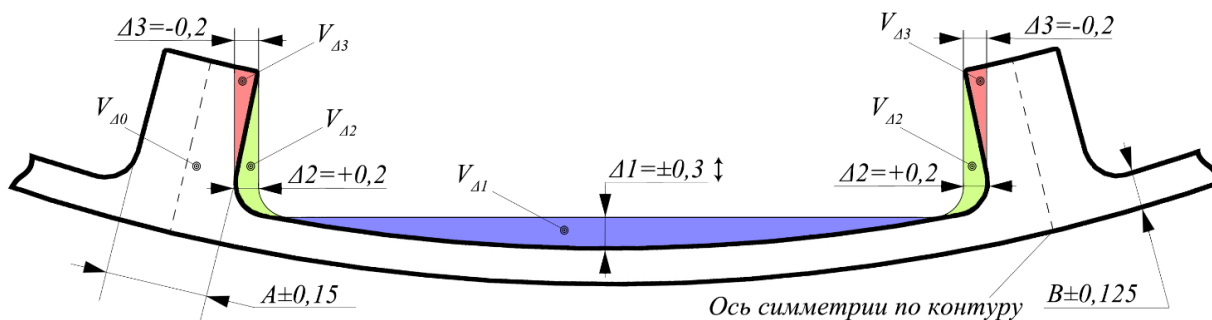


Рис. 2. Схема распределения объемов после фрезерования одной ячейки  
Fig. 2. Volume distribution scheme after milling one cell

нии по контуру по оси симметрии ребра, составляет  $M_{\Delta 0}$ . При условии сохранения расчетного объема  $V_{\Delta 0} = \Phi_{\Delta 0}$  критерий  $S$  имеет вид:

$$S_{\Delta 0} = \frac{M_{\Delta 0}}{\Phi_{\Delta 0}} \times n_{яч}; \quad (1)$$

В дальнейшем уменьшение значения критерия будет значить повышение массы обечайки за счет остаточного необработанного объема  $V_{\Delta}$  с сохранением совершенства фактической формы ячейки  $\Phi_{ФАКТ}$  и ее номинальных размеров. А увеличение значения критерия будет значить также повышение массы обечайки, но при критическом изменении формы ячейки  $\Phi_{ФАКТ}$  и ее номинальных размеров.

#### Анализ результатов экспериментов

##### 1. Расчет критерия $S$ .

По представленной схеме (рис. 2) определено влияние остаточного необработанного объема материала на изменение начальной массы ячейки и, следовательно, обечайки. Для случая, когда после обработки остается объем  $V_{\Delta 1}$  и  $V_{\Delta 2}$ , несовершенство формы  $\Phi_{\Delta 1,2}$  и критерий  $S$ , имеет вид:

$$\Phi_{\Delta 1,2} = V_{\Delta 0} + V_{\Delta 3} + 2 \times V_{\Delta 2} \Rightarrow S_{\Delta 1,2} = \frac{M_{\Delta 0}}{\Phi_{\Delta 1,2}} \times n_{яч}; \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2) и решая пропорциональное отношение, получаем выражения увеличения массы на  $|m_{\Delta 1,2}| = M_{\Delta 0} - X_{\Delta 1,2}$  и массу ячейки  $M_{\Delta 1,2} = M_{\Delta 0} + |m_{\Delta 1,2}|$  с формой  $\Phi_{\Delta 1,2}$ :

$$\frac{S_{\Delta 0}}{M_{\Delta 0}} = \frac{S_{\Delta 1,2}}{(M_{\Delta 0} - X_{\Delta 1,2})} \Rightarrow |m_{\Delta 1,2}| = 3,3 \text{ г} \Rightarrow M_{\Delta 1,2} = M_{\Delta 0} \approx 58 \text{ г}. \quad (3)$$

С учетом добавляемого объема  $V_{\Delta 1}$  и  $V_{\Delta 2}$  масса одной обечайки увеличивается на  $\approx 4,3$  кг. В таком случае, с учетом приведенного количества обечаек, на первую ступень РН «Ангара-1.2» и вторую ступень РН «Ангара-5» произойдет увеличение массы на 103,2 кг. Для первой ступени РН «Ангара-5» увеличение массы на 412,8 кг.

Варианты с удалением  $V_{\Delta 3}$ , при остаточном  $V_{\Delta 1}$ , стоит рассматривать в том случае, если допускается допущение в изменениях конструкторских параметров, определяющих прочность и несущую способ-

ность баков. Для выполнения формы  $\Phi_{\Delta 1,3}$ , удаления объема  $V_{\Delta 3}$  фактически приводит к выходу за поле допуска толщины ребра  $A \pm 0,15$ , при этом объем  $V_{\Delta 1}$  остается неизменным. В случае корректировки параметра  $\Delta 1$  в отрицательном направлении параметр  $\Delta 2$  будет только увеличиваться.

##### 2. Расчет производительности.

Для расчета производительности фрезерования вафельного фона на цилиндрической и плоской образующих смоделирован процесс обработки ячеек на плоской панели и на обечайке  $R_H = 1451$  мм секцией  $\sim 180^\circ$ , с общим количеством ячеек в обоих случаях по  $n_{яч}$ .

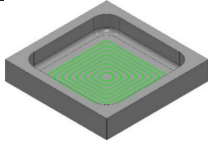
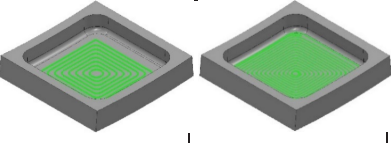
При моделировании процесса обработки в САМ-системе PowerMILL режимы резания для фрезы «НАМ8185 18,0/15,0/80,0» принимались реальными, соответствующими действительным:  $V_C = 1583$  м/мин ( $n = 28000$  об/мин),  $F_Z = 0,18$  мм ( $F_{МИН} = 10000$  мм/мин),  $A_E = 3$  мм,  $A_P = 11,8$  мм. И назначались одинаковыми для стратегий обработки контура ячейки концентричными и эквидистантными проходами из центра. Эти же режимы назначались для дополнительной сферической фрезы  $\Phi 6R3$ , необходимой для полноты расчета времени цикла стратегии фасонного фрезерования с наклоном оси инструмента для обработки поднутрения стенки. Время наклонного врезания на уровень обработки и время переходов не учитывалось, допускается принять его одинаковым для всех обсуждаемых случаев. Учитывалось только время рабочего хода обработки ячейки в один чистовой цикл. Параметры технологичности системы станок – приспособление – инструмент – деталь и динамические особенности оборудования условно упрощались.

С учетом выше приведенных обоснований анализ проводился для четырех схем фрезерования вафельного фона (табл. 2) с соответствующими представлениями формы ячейки:

- «а» (рис. 3) – трехкоординатная обработка плоской формы;
- «б/ $V_{\Delta 0}$ » (рис. 3) – многоосевая обработка формы объемом  $V_{\Delta 0}$ ;
- «б/ $V_{\Delta 0,1,2}$ » (рис. 3) – многоосевая обработка формы с остаточным избыточным объемом материала  $V_{\Delta 1}$  и  $V_{\Delta 2}$ ;
- «б/ $V_{\Delta 0,1,3}$ » (рис. 3) – многоосевая обработка формы с остаточным избыточным объемом материала  $V_{\Delta 1}$  и удаляемым объемом  $V_{\Delta 3}$ .

Для схем «б/ $V_{\Delta 0,1,2}$ » и «б/ $V_{\Delta 0,1,3}$ » время цикла обработки будет совпадать со случаем «а» ввиду схожести геометрических параметров формы получаемой ячейки, но с использованием многокоординатного станка для зеркального фрезерования.

Таблица 2. Цикл фрезерной обработки для ячеек вафельного фона  
Table 2. Waffle background cell milling cycle

	Ячейка «а»	Ячейка «б/ $V_{\Delta 0}$ »
Станок	трехкоординатный станок порталного типа	многокоординатный станок порталного типа для зеркального фрезерования
Инструмент	1 единица ➤ пальцевая фреза с радиусом скругления режущей кромки R3 мм	2 единицы ➤ пальцевая фреза с радиусом скругления режущей кромки R3 мм ➤ сферическая фреза R3 мм
	Траектория I переход: стратегия контурного фрезерования концентричными эквидистантными проходами 	II переход: стратегия фасонного фрезерования с наклонном оси инструмента для обработки поднутрения стенки 
Время цикла	Рабочие ходы Длина Линия 692,874766 Дуги 164,775562 Всего 857,650328 Время 0:00:04 0:00:00 0:00:05	Рабочие ходы Длина Линия 2605,25575 Дуги 163,81481 Всего 2769,07056 Время 0:00:15 0:00:00 0:00:16

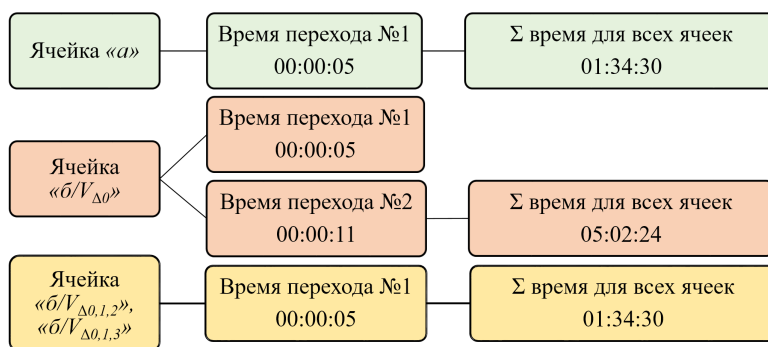


Рис. 3. Расчетное время обработки вафельного фона  
Fig. 3. Estimated waffle background processing time

Из полученных значений расчетного времени (рис. 3), очевидно, что для схемы фрезерования «б/ $V_{\Delta 0}$ » обработка фасонной поверхности дна ячейки, даже с остаточным гребешком  $\approx 0,25 \pm 0,3$  мм, приводит к увеличению времени цикла в 2,2 раза. Именно по этой причине подобная схема фрезерования не применяется на предприятиях отрасли даже при наличии на нем многокоординатного оборудования для зеркального фрезерования.

Из условий повышения производительности обработки стоит рассматривать схемы фрезерования «а», «б/ $V_{\Delta 0,1,2}$ » и «б/ $V_{\Delta 0,1,3}$ » и обязательно связывать с сокращением времени на слесарную операцию. Сведение к нулю слесарной обработки возможно

только при автоматической механической обработке притупления кромок и устранения дефектов необрабатываемых поверхностей на станке. Причем успешно объединить обработку ячейки и ее притупления по контуру, соблюдая допуск, можно, исключив фактор влияния погрешности заготовки (предусмотренная стандартом разнотолщинность) [18].

Классические подходы механической обработки в обеспечении точности (номинальных размеров, их допусков), технических требований КД, снижения систематических и случайных погрешностей предусматривают обработку за один установ группы связанных конструктивных элементов. Следовательно, необходимо ликвидировать разно-

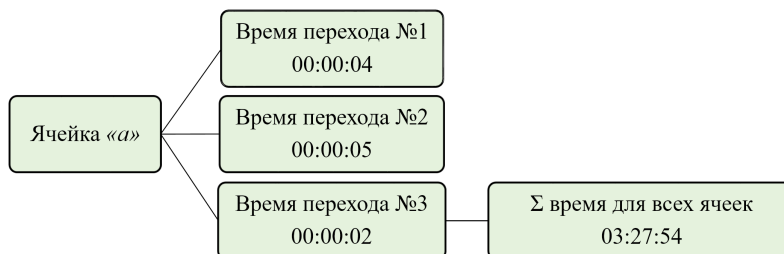
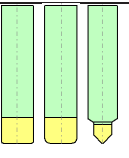
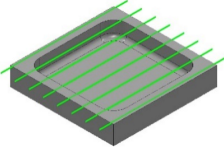
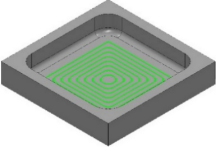
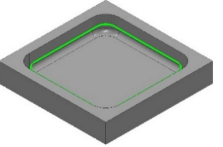


Рис. 4. Расчетное время схемы «а» с надбавочным временем  
Fig. 4. Estimated time of the scheme «a» with overtime

Таблица 3. Оптимизация цикла фрезерной обработки вафельного фона  
Table 3. Optimization of the wafer background milling cycle

	Ячейка «а»	
Станок	3-ех координатный станок портального типа	
Инструмент		3 единицы
		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ пальцевая фреза</li> <li>➤ пальцевая фреза с радиусом скругления режущей кромки R3 мм</li> <li>➤ угловая фреза</li> </ul>
Траектория	I переход: стратегия плоского фрезерования торцевой поверхности	
	II переход: стратегия контурного фрезерования концентричными эквидистантными проходами	
	III переход: стратегия обработки притупления эквидистантным проходом	
		
		
Время цикла	Рабочие ходы	
	Линия	Длина: 1693,614073
	Дуги	Время: 0:00:10
	Всего	Длина: 164,775562
		Время: 0:00:00
		Всего: 0:00:11

толщинность параллельной обработкой торцевых плоскостей заготовки с двух сторон и после выполнения обработку ячейки с ее притуплением за один технологический установ.

Для схем «б/V<sub>Δ0,1,2</sub>» и «б/V<sub>Δ0,1,3</sub>» выполнение такого аргумента затруднено ввиду уже присутствующей кривизны поверхностей R<sub>Н</sub> и R<sub>В</sub> (наружный и внутренний радиус обечайки) или потребует предварительной операции обработки плоскостей перед формообразованием в обечайку. Еще одним недостатком является сложность обработки компенсатора на загнутой обечайке, его фасонная поверхность концентрична R<sub>Н</sub> и R<sub>В</sub> и по типу обработки совпадает со схемой «б/V<sub>Δ0</sub>». В цилиндрическом виде обработка указанных поверхностей, заодно с ячейками, не представляется действительной.

Принимая вышеприведенные аргументы, оптимальное исполнение вафельного фона возможно по оптимизированной схеме «а» с учетом рассчитанного надбавочного времени (рис. 4), включающая обработку торцевой поверхности и притупления (табл. 3).

## Выводы и заключение

Таким образом, с целью сохранения совершенства геометрической формы ячейки вафельного фона и обеспечение допуска массы детали, рационально фрезеровать подкрепление на плоской заготовке и после этого производить формообразование в обечайку или оболочку. При этом возможно использовать стандартное недорогое трехкоординатное фрезерное оборудование. Что позволит снизить себестоимость изготовления вафельных обечаек.

С другой стороны существуют проблемы в стабильности резания при обработке вафельного фона на крупногабаритных плоских панелях. На практике решение подобных проблем сводится к применению дорогостоящих станков с программируемым адаптивным упором. Но в некоторых случаях возможно вычислить диапазон параметров резания и геометрию режущего инструмента, с которыми можно реализовать стабильную фрезерную обработку как на плоской, так и на загнутой заготовке.

1. ГОСТ 22350-91. Корпус ракеты на жидком топливе. Термины и определения. Введ. 1992–07–01. Москва: Изд-во стандартов, 1991. 17 с.
2. Бронз А. В., Ефремов В. И., Плотников А. Д., Чернявский А. Г. Сплав 1570С — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия» // Космическая техника и технологии. 2014. № 4 (7). С. 62–67.
3. Кулага Е. С. От самолетов к ракетам и космическим кораблям. Москва: Воздушный транспорт, 2001. С. 178. ISBN 5-88821-041-2.
4. Sabir R., Khan A. A., Hasham H. J., Zeeshan Q. A Survey of Recent Developments in Optimization of Iso-Grid Cylinders // Journal of Space Technology. 2015. Vol. 5 (1). P. 103–115.
5. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. Москва: Машиностроение, 1976. С. 7–127.
6. Нестеров В. Е. Космический ракетный комплекс «Ангара». История создания. В 2 т. Москва: Ремарко, 2018. Т. 2. 539 с. ISBN 978-5-903615-90-2.
7. Данченко В. Г., Шевцов Е. И., Гусев В. В. Способ оптимизации массы локально нагруженных отсеков ракет вафельной конструкции // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2017. № 2 (114). С. 131–136.
8. Дубцов А. И. «Ту заводскую проходную, что в люди вывела меня...» // Синева. 2017. № 1 (38). С. 8–10.
9. Батрутдинов Р. Г., Сысоев С. К. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1, № 7. С. 7–8.
10. Михрютин В. В., Шерстобитов М. А. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П. А. Соловьева. 2012. № 2 (23). С. 279–284.
11. Panczuk R., Foissac P.-Y. Machining process for panel and device for machining of at least one panel. Brazil patent BRPI0415768B1; filed October 22th, 2004; published July 4th, 2017.
12. Зайцев А. М. Разработка направлений повышения эффективности технологической подготовки производства деталей и узлов ракетно-космической техники: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 171 с.
13. Bravo U., Altuzarra O., Lopez de Lacalle L. N. [et al.]. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. Vol. 45, Issue 15. P. 1669–1680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.03.004.
14. Ibaraki S., Shimizu T. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes // Precision Engineering. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 675–682. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001.
15. Rott O., Hцumberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Preprint. No. 1151. Berlin: WIAS, 2006. 23 p.
16. Altintas Yu. Manufacturing Automation. Cambridge University Press, 2000. 286 p. ISBN 978-1-107-00148-0.
17. Faassen R. P. H., van de Wouw N., Oosterling J. A. J. [et al.]. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 43, Issue 14. P. 1437–1446. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00171-8.
18. ОСТ 1 92001-90. Плиты повышенного качества из алюминиевого сплава марки АМг6. Технические условия. Введ. 1995–10–01. Москва: ВИАС, 1995. 27 с.

---

**КРИВОНОС Евгений Викторович**, старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

SPIN-код: 7238-5136

AuthorID (РИНЦ): 762266

ORCID: 0000-0001-8485-1862

AuthorID (SCOPUS): 57193400934

ResearcherID: ABC-7096-2020

Адрес для переписки: [evgenii.krivonos@mail.ru](mailto:evgenii.krivonos@mail.ru)

#### Для цитирования

Кривонос Е. В. Обоснование схемы фрезерования вафельного фона // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 83–90. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-83-90.

Статья поступила в редакцию 25.06.2021 г.

© Е. В. Кривонос

# JUSTIFICATION SCHEME FOR MILLING WAFFLE BACKGROUND

E. V. Krivonos

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

**In the manufacture of dry and fuel compartments of missiles ensuring weight tolerance is a priority. In practice, this is ensured by the introduction of lightweight materials together with the optimal design of the supporting set of ribs (waffle background) of orthotropic shells and waffle shells. The manufacturing technology of which is difficult and costly in view of the difficulty of ensuring the accuracy and perfection of the shape of the waffle background cell.**

**In modern conditions, when manufacturing a waffle shell for a fuel tank, reinforcement processing is carried out by milling on a monolithic blank using specialized machine systems. At the same time, the choice of the waffle background processing scheme remains an urgent issue: on a flat panel or on a bent shell. The problem of selection arises due to the requirements for the accuracy of the waffle background. It is important to maintain the part mass tolerance and geometric perfection of the cell shape. All this generally affects the perception of design loads and the carrying capacity of the rocket. At the same time, the methods and processes of processing the waffle background should be productive and economically feasible.**

**The proposed justification will make it possible at the start of the design of new promising products to more accurately determine the technological and production costs necessary for the production of parts with a waffle background with given parameters and accuracy.**

**Keywords: waffle panel, waffle shell, waffle background milling, missile fuel tank, AMg6 alloy.**

## References

1. GOST 22350-91. Korpus rakety na zhidkom toplive. Terminy i opredeleniya [Liquid propellant rocket body. Terms and Definitions]. Moscow, 1991. 17 p. (In Russ.).
2. Bronz A. V., Efremov V. I., Plotnikov A. D., Chernyavsky A. G. Splav 1570S — material dlya germetichnykh konstruktivnykh perspektivnykh mnogorazovykh izdeliy RKK «Energiya» [Alloy 1570c — Material for Pressurized Structures of Advanced Reusable Vehicles of RSC Energia] // *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. Space Engineering and Technology*. 2014. No. 4 (7). P. 62–67. (In Russ.).
3. Kulaga E. S. Ot samoletov k raketam i kosmicheskim korablyam [From aircraft to rockets and space ships]. Moscow, 2001. P. 178. ISBN 5-88821-041-2. (In Russ.).
4. Sabir R., Khan A. A., Hasham H. J., Zeeshan Q. A Survey of Recent Developments in Optimization of Iso-Grid Cylinders // *Journal of Space Technology*. 2015. Vol. 5 (1). P. 103–115. (In Engl.).
5. Lizin V. T., Pyatkin V. A. Proyektirovaniye tonkostennykh konstruktivnykh [Design of thin-walled structures]. Moscow, 1976. P. 7–127. (In Russ.).
6. Nesterov V. E. Kosmicheskii raketnyy kompleks «Angara». Istoriya sozdaniya [Space rocket complex «Angara». History of creation]. In 2 vols. Moscow, 2018. Vol. 2. 539 p. ISBN 978-5-903615-90-2. (In Russ.).
7. Danchenko V. G., Shevtsov E. I., Gusev V. V. Sposob optimizatsii massy lokal'no nagruzhenykh otsekov raket vafel'noy konstruktivnykh [Method of optimizing the mass of locally loaded compartments of wafer-type rockets] // *Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoye vooruzheniye. Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoye vooruzheniye*. 2017. No. 2 (114). P. 131–136. (In Russ.).
8. Dubtsov A. I. «Tu zavodskuyu prokhodnuyu, chto v lyudi vyvela menya...» [«That factory checkpoint that brought me to the people ...»] // *Sineva. Sineva*. 2017. No. 1 (38). P. 8–10. (In Russ.).
9. Batrutdinov R. G., Sysoyev S. K. Tekhnologiya izgotovleniya vafel'nogo fona v obechaykakh letatel'nykh apparatov [Manufacturing technology of wafer background in the shells of aircraft] // *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики. Aktual'nyye Problemy Aviatsii i Kosmonavтики*. 2011. Vol. 1, no. 7. P. 7–8. (In Russ.).
10. Mikhryutin V. V., Sherstobitov M. A. Metody mekhanicheskoy obrabotki listovykh obshivok planera samoletov [Methods of mechanical processing of sheet skins of airframes] // *Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta im. P. A. Solov'yeva. Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University*. 2012. No. 2 (23). P. 279–284. (In Russ.).
11. Panczuk R., Foissac P.-Y. Machining process for panel and device for machining of at least one panel. Brazil patent BRPI0415768B1; filed October 22th, 2004; published July 4th, 2017. (In Engl.).
12. Zaytsev A. M. Razrabotka napravleniy povysheniya effektivnosti tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva detaley i uzlov raketno-kosmicheskoy tekhniki [Development of directions for increasing the efficiency of technological preparation of production of parts and units of rocket and space technology]. Moscow, 2016. 171 p. (In Russ.).
13. Bravo U., Altuzarra O., Lopez de Lacalle L. N. [et al.]. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45, Issue 15. P. 1669–1680. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.03.004. (In Engl.).
14. Ibaraki S., Shimizu T. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes // *Precision Engineering*. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 675–682. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001. (In Engl.).
15. Rott O., Humberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Preprint. No. 1151. Berlin: WIAS, 2006. 23 p. (In Engl.).

16. Altintas Yu. Manufacturing Automation. Cambridge University Press, 2000. 286 p. ISBN 978-1-107-00148-0. (In Engl.).

17. Faassen R. P. H., van de Wouw N., Oosterling J. A. J. [et al.]. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 43, Issue 14. P. 1437–1446. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00171-8. (In Engl.).

18. OST 1 92001-90. Plity povyshennogo kachestva iz alyuminiyevogo splava marki AMg6. Tekhnicheskiye usloviya [High quality plates made of AMg6 aluminum alloy. Technical conditions]. Moscow, 1995. 27 p. (In Russ.).

---

**KRIVONOS Evgeny Viktorovich**, Senior Lecturer of Metal-Cutting Machines and Tools Department.

SPIN-code: 7238-5136

AuthorID (RSCI): 762266

ORCID: 0000-0001-8485-1862

AuthorID (SCOPUS): 57193400934

ResearcherID: ABC-7096-2020

Correspondence address: [evgenii.krivonos@mail.ru](mailto:evgenii.krivonos@mail.ru)

**For citations**

Krivonos E. V. Justification scheme for milling waffle background // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 83–90. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-83-90.

**Received June 25, 2021.**

© **E. V. Krivonos**