

УДК 65.012.12

Проектирование изделий с учетом организационно-технических возможностей дискретного машиностроительного производства

Кабанов А. А.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993

Россия

e-mail: arezont@gmail.com

Аннотация:

В работе представлена методология поиска и выбора предпочтительных вариантов конструкторско-технологических решений конструкций изделий, ориентированных на возможности дискретного машиностроительного производства. В качестве инструментов методологии использованы технологии сетевого и имитационного моделирования. Рассматриваются модели изделия, производственного процесса, производственной системы, а также модель принятия решений выбора предпочтительного варианта. Использование методологии показано на примере изделий аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: конструкторско-технологическое проектирование, организационно-техническое проектирование, математическая модель изделия, производственного процесса, производственной системы, сетевое моделирование, имитационное моделирование.

Введение

В настоящее время существует достаточно большой сегмент изделий авиационной и космической отраслей отечественного производства, разработанных 20 – 30 лет назад, но по своим техническим характеристикам являющихся востребованными. Однако, как правило, в большинстве случаев, они

уступают зарубежным аналогам в стоимости и длительности циклов изготовления, в последнем случае напрямую влияющих на срок поставки изделий. Кроме того, в разной степени, но, практически перед всеми предприятиями отрасли сегодня стоит задача их модернизации и (или) реконструкции, что принципиально невозможно без доработки изделий, ориентированных на технологии предыдущего поколения. Таким образом, задача разработки конструкторско-технологических решений изделий, учитывающих возможности дискретного машиностроительного производства является актуальной.

Постановка задачи

Существует множество вариантов конструкторско-технологических решений изделий или его компонентов. Подразумевается, что каждый из элементов множества обеспечивает выполнение изделием своего служебного назначения, т.е., названные варианты являются эквивалентными по отношению к существующему (базовому) конструкторско-технологическому решению изделия. Таким образом, задача состоит в выборе предпочтительного варианта из названного множества. При этом важно, во-первых правильно сформировать условие эквивалентности, поскольку очевидно, что полное совпадение свойств даст базовое решение. И, во-вторых, определить критерии отбора, по которым будет отбираться предпочтительный вариант.

Метод решения задачи

Метод решения поставленной задачи базируется на следующих положениях:

1. Поставленная задача является сложной многокритериальной задачей, для ее решения требуется комплекс взаимосвязанных моделей: изделия, процесса изготовления, и используемой в этих целях производственной системы. Это обусловлено тем, что структура стоимости изделия включает все названные категории;
2. Основной математической моделью, для всех трех перечисленных категорий является сетевая модель или сетевой график;

3. Важен порядок разработки моделей по п.п. 1, 2, обусловленный преемственностью и наследованием связей при переходе от одной модели к другой:

модель изделия → модель процесса → модель мощности

Выявленные преемственность и связи, не только позволяют обеспечить управляемость процесса выбора вариантов конструкторско-технологических решений с точки зрения сокращения производственных затрат, но и дают достаточно обширные предпосылки для автоматизации этой деятельности с использованием принципов объектно-ориентированного программирования:

- a. Сетевая модель изделия описывает его состав (вершины графа) и входимость (дуги графа) элементов изделия друг в друга;
 - b. Сетевая модель процесса изготовления изделия, является вторичной, по отношению к модели п.а, и формируется путем сопоставления соответствующих вершин графа в паре «компонент изделия – процесс изготовления компонента», и дуг графа в паре «входимость компонента в компонент верхнего уровня – отношение предшествования/следования между реализацией процессов по изменению состояния этих компонентов»;
 - c. Сетевая модель производственной системы (ресурсная сетевая модель), является вторичной по отношению к модели п.б с соответствием вершин – «процесс – мощность» и дуг – «отношение предшествование/следование – транспортно-логистическая связь»;
4. Решение задачи является поэтапным, итерационным, длительным процессом, по мере которого, в первую очередь происходит отсев «грубых» неудовлетворительных решений.
5. Решение задачи требует информационного обеспечения в виде баз данных, а также программную реализацию сопутствующих алгоритмов. Таким образом актуальна задача создания программно-информационного комплекса поддержки рассматриваемого процесса.

Алгоритм¹ решения:

- Разработка математической модели изделия: графа сборочного состава изделия;
- Разработка сетевой модели производственного процесса изготовления изделия на основе графа сборочного состава изделия;
- Анализ сетевой модели, выявление критических и околоскритических путей сетевой модели производственного процесса изготовления изделия;
- Выявление «критических» процессов, определяющих найденные критические и околоскритические пути сетевой модели, определение конструкций, подлежащих изменению. Здесь, а также для следующего пункта, следует отметить, что сегодня известен широкий набор приемов по нахождению «критических» параметров, начиная от метода Тагути [1], и заканчивая Теорией Ограничений Голдратта [2];
- Разработка вариантов конструкторско-технологических решений конструкций;
- Разработка сетевых моделей производственного процесса вариантов изготовления изделий;
- Анализ длительностей производственного цикла;
- Разработка ресурсных сетевых моделей, позволяющей учесть ограничения по производственным мощностям;
- Анализ ресурсных сетевых моделей, выбор предпочтительного варианта по критерию наименьшего значения длительности производственного цикла;
- Разработка имитационной модели производственной системы на базе выбранного варианта ресурсной сетевой модели для учета организационной составляющей и изменчивости рыночной ситуации:

¹ Для наглядности и экономии места, здесь ограничимся вербальной его трактовкой, без указания итераций.

- режим работы производства, партионный характер производства, сбои в производстве;
- Разработка модели влияния рыночных условий на сроки поставки изделий.

Практика на примере изделий авиационно-космической отрасли

Для демонстрации разработанной методологии в решении поставленной задачи приведем примеры, реализованные на действующих изделиях предприятий авиационно-космической отрасли. Поскольку формат статьи имеет фиксированные рамки, особое внимание уделено технической (инженерной) стороне разработки конструкторско-технологических решений. Поиск «критических» решений с точки зрения производственных возможностей исследовался автором в работах [3], [4]. Применение технологии имитационного моделирования производственных систем рассмотрено автором в [5]. По этим же причинам ограничимся двумя примерами.

Пример 1.

Рассматривается контейнер радиоэлектронных помех (РЭП). Изделие, показано на рисунке 1, устанавливается на самолетах и вертолетах, служит для размещения средств постановки помех. Конструкция изделия представляет собой тонкостенную оболочку подкрепленную шпангоутами. Для крепления к носителям используются силовые шпангоуты.

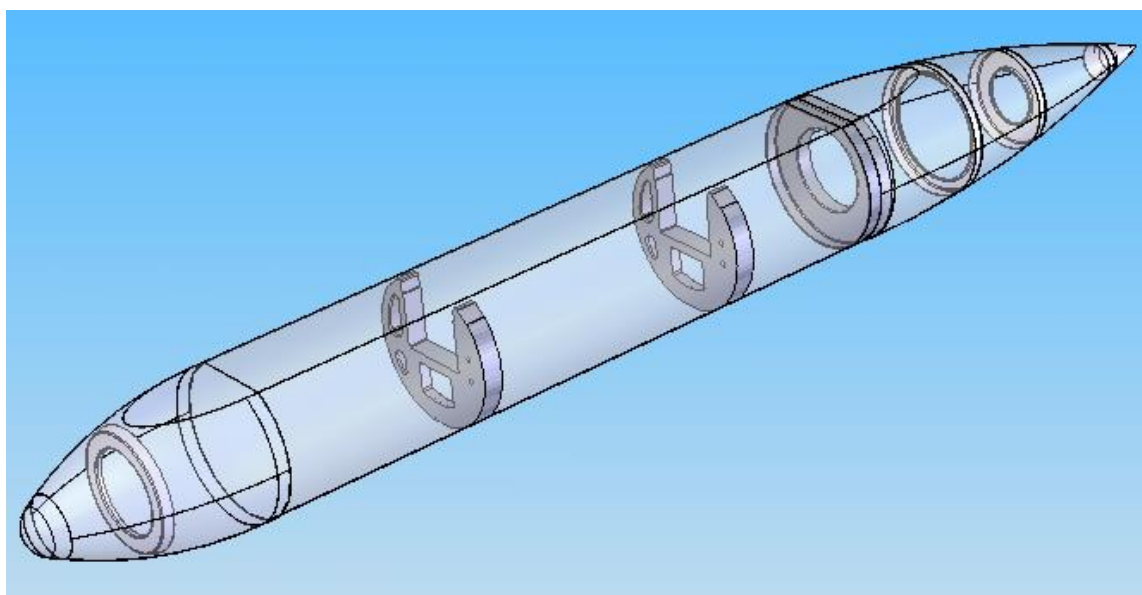


Рис. 1. Контейнер РЭП

На основании разработанного метода и алгоритмов выявлены «проблемные» конструкции изделия:

- а. Конструкция силовых шпангоутов;
- б. Конструкция корпуса: переднего и заднего обтекателей (коков), контейнера.

Рассмотрим силовой шпангоут. Изделие имеет недостаточную технологическую жесткость, что приводит к росту объема доводочных работ и повышению трудоемкости изготовления изделия. Поиск эквивалентного конструкторско-технологического решения шпангоута идет в направлении повышения технологической жесткости с сохранением эксплуатационных характеристик изделия, в рассматриваемом случае – способности воспринимать нагрузку.

Шпангоут представляет собой кольцо двутаврового сечения, сверху подкрепленное перегородкой. Аналитический расчет шпангоутов в средней части изделия достаточно сложен, поскольку стенка и подкрепляющие ее элементы повышают порядок статической неопределимости системы [6]. Их расчет ведется сведением к решетчатой системе с ячейками [6].

Вопросы проектирования кольцевых шпангоутов достаточно подробно изложены в [7]. Согласно [7] «задача проектирования силового шпангоута состоит

в определении профиля сечения, его высоты, толщины стенок и назначении конструктивных мероприятий, исключающих потерю устойчивости тонкостенных элементов шпангоута».

Для простоты изменением сечения шпангоута пренебрежем. На рисунке 2 приведены геометрические характеристики и схема нагружения шпангоута.

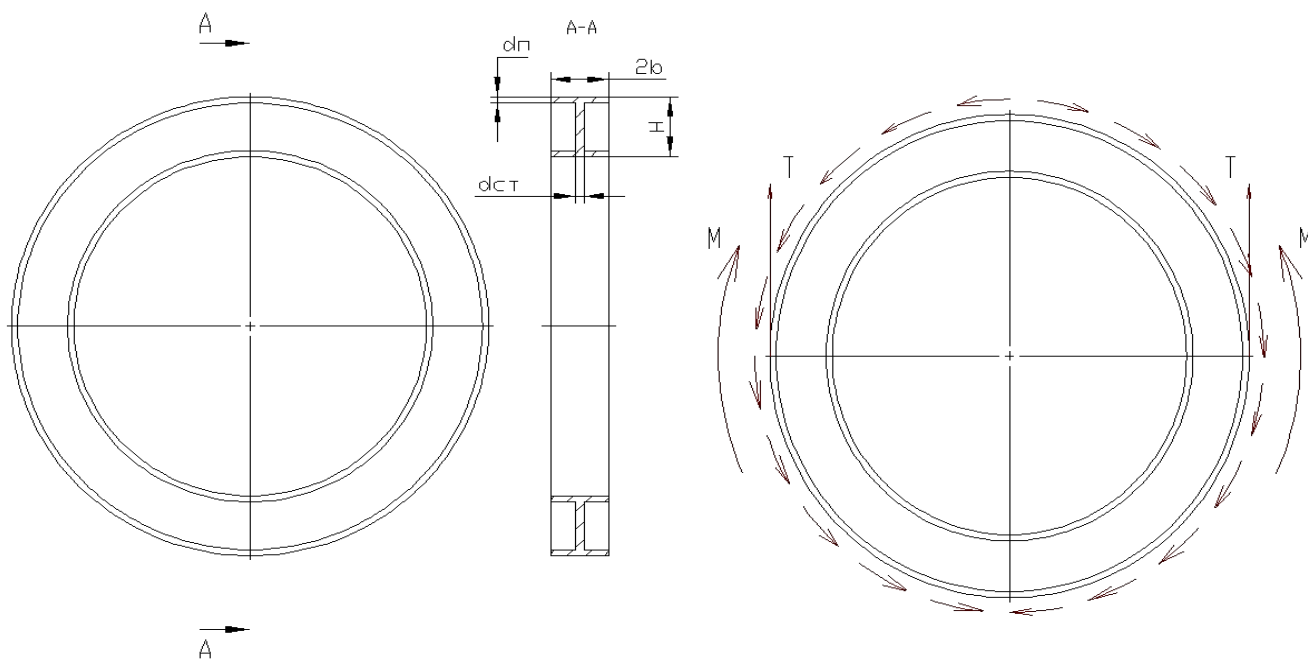


Рис. 2. Геометрические характеристики сечения и схема нагружения шпангоута

Таким образом, варьируемые параметры: $\delta_{\text{п}}$, $\delta_{\text{с т}}$, b , H .

Согласно [7] «при выбранной высоте шпангоута H усилия $R_{\text{п}}$ в наружной и внутренней полках шпангоута определяют приближенно по формуле:

$$R_{\text{п}} = N_{\text{п}} \pm M/H \quad 1$$

Площадь сечения полок определяют из соотношения, обеспечивающего выполнение требования равенства при эксплуатационной нагрузке $R_{\text{п}}(\varepsilon)$ максимальных напряжений в полке ($|\sigma_{\text{п}}^{\varepsilon}|_{\text{max}}$) пределу текучести материала $\sigma_{0,2}$:

$$|\sigma_{\text{п}}^{\varepsilon}|_{\text{max}} = |R_{\text{п}}^{\varepsilon}|_{\text{max}} / F_{\text{п}} \leq \sigma_{0,2} \quad 2$$

Соотношение между толщиной $\delta_{\text{п}}$ и шириной $2b$ полки определяют, обеспечивая выполнение условия устойчивости при расчетной нагрузке $R^{\text{п}}$:

$$|\sigma^{\text{п}}|_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{кр}} \quad 3$$

Приближенно:

$$\sigma_{кр} = k E (\delta_{п}/b)^2 \quad 4$$

Толщину стенки шпангоута определяют, считая приближенно касательные напряжения равномерно распределенными по высоте и толщине стенки и не превышающими значения τ_B :

$$\tau^p = Q^p_{max} / (H \delta_{ст}) \leq \tau_B \quad 5$$

При работе стенки на сдвиг иногда допускают потерю ее устойчивости, так как обычно это не вызывает разрушения конструкции» [7].

В противном случае, согласно [8], «стенки балок для обеспечения их устойчивости следует укреплять:

Поперечными основными ребрами, поставленными на всю высоту стенки;

Поперечными основными и продольными ребрами;

Поперечными основными и промежуточными короткими ребрами и продольным ребром (при этом промежуточные короткие ребра следует располагать между сжатым поясом и продольным ребром).

Прямоугольные отсеки стенки (пластинки), заключенные между поясами и соседними поперечными основными ребрами жесткости, следует рассчитывать на устойчивость. При этом расчетными размерами проверяемой пластинки являются:

a – расстояние между осями поперечных основных ребер;

h_{ef} – расчетная высота стенки, равная в сварных балках полной высоте стенки, в балках с поясными соединениями на высокопрочных болтах – расстоянию между ближайшими к оси балки краями поясных уголков, в балках, составленных из прокатных профилей, – расстоянию между началами внутренних закруглений, в гнутых профилях – расстоянию между краями выкружек.» [8].

Согласно, тому же [8] стенки балок следует укреплять поперечными ребрами жесткости, если значения условной гибкости стенки балки λ_w превышают 3,2 при отсутствии подвижной нагрузки и 2,2 – при наличии подвижной нагрузки на поясе балки...».

Таким образом, при условии, что материал шпангоутов один и тот же, а также при одинаковых условиях нагружения, получим соотношение площадей сечений полок шпангоутов:

$$\delta_{п2}b_2 \geq \delta_{п1}b_1 \quad 6$$

При этом обеспечение выполнения условия устойчивости полки при расчетной нагрузке $P_{п}$ дает еще одно соотношение:

$$\delta_{п2}/b_2 \geq \delta_{п1}/b_1 \quad 7$$

Замечание: Во избежание прироста массы шпангоута в соотношении 6 следует добиваться строго равенства, при выполнении условия 6:

$$\begin{cases} \delta_{п2}b_2 = \delta_{п1}b_1, \\ \delta_{п2}/b_2 \geq \delta_{п1}/b_1 \end{cases} \quad 8$$

Соотношение толщин стенок шпангоутов:

$$\delta_{ст2}H_2 \geq \delta_{ст1}H_1 \quad 9$$

Аналогично выше указанному замечанию в соотношении 9 также следует добиваться строго равенства.

Кроме того, принимая во внимание 1, данные выводы верны, при условии, что высоты стенок мало отличаются, т.е $H_2 \approx H_1$

Таким образом, запишем условие эквивалентности базового и предлагаемого конструкторско-технологического решения.

$$\begin{cases} \delta_{п2}b_2 = \delta_{п1}b_1, \\ \delta_{п2}/b_2 \geq \delta_{п1}/b_1, \\ \delta_{ст2}H_2 = \delta_{ст1}H_1, \\ H_2 \approx H_1 \end{cases} \quad 10$$

Тогда, в числовом выражении:

Для исходной конструкции шпангоута: $\delta_{п1} = 3\text{мм}$, $\delta_{ст} = 3\text{мм}$, $b = 25\text{мм}$, $H = 54,8\text{мм}$.

Предлагаемый вариант (например): $\delta_{п1} = 4\text{мм}$, $\delta_{ст} = 3,11\text{мм}$, $b = 18,75\text{мм}$, $H = 52,8\text{мм}$. Выполняя:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4 \times 18,75 = 3 \times 25, \\ 4/18,75 \geq 3/25, \\ 3,11 \times 52,8 = 3 \times 54,8 \\ 52,8 \approx 54,8 \end{array} \right.$$

Очевидно, что в этом случае конструкция, при той же массе, кроме того, гораздо лучше работает на устойчивость: $0,21 \geq 0,12$.

Таким образом, предлагаемый вариант конструкторско-технологического решения имеет повышенную технологическую жесткость по сравнению с исходным вариантом, что позволяет повысить точность сборочных работ, снизить долю доводочных работ, снизить трудоемкость работ.

в. Конструкция корпуса: переднего и заднего обтекателей (коков), контейнера.

Рассмотрим конструкции обтекателей (коков). Исходная конструкция, на рисунке 3 вверху, состоит из 2-ух штампованных обшивок: верхней и нижней, соединяемых при помощи заклепок по боковым полосам. Для такой конструкции характерны следующие недостатки. Во-первых малая жесткость деталей и малые габаритные размеры, порядка 300 мм в диаметре, характеризуются исключительной трудоемкостью сборочных работ. Во-вторых, для изготовления верхней и нижней обшивок используются штампы, что нерационально для небольших объемов выпуска изделия.

Предлагается эквивалентный по эксплуатационным характеристикам вариант, снизу на рисунке 3, при котором обшивка выполнена цельной, методом ротационной вытяжки на горизонтально-раскатном станке СРГ 0,6-1000. Расчеты, согласно [9] показали, что для возможности раскатки плоской заготовки в оживальную необходим более пластичный материал, и кроме того, большей толщины: 1,5 мм вместо исходных 1,2 мм.

Приведем характеристики материала обшивок исходного и предлагаемого вариантов:

Исходная конструкция: материал обшивки Д16АМ 1,2 с механическими характеристиками $\sigma_{в} = 22 \text{ кгс/мм}^2$ (220 МПа) $\sigma_{0,2} = 15 \text{ кг/мм}^2$ (150 МПа). Плотность 2800 кг/м³.

Предлагаемая эквивалентная конструкция: материал обшивки АМГ6М 1,5 с механическими характеристиками $\sigma_{в} = 20 \text{ кгс/мм}^2$ (200 МПа) $\sigma_{0,2} = 11 \text{ кг/мм}^2$ (110 МПа). Плотность 2640 кг/м³.

Можно видеть, что механические характеристики исходного варианта выше, чем предлагаемого, что, однако компенсируется увеличенной толщиной обшивки. При этом эквивалентность, если говорить об обшивках, достигается и по критерию массы, поскольку плотность АМГ6М ниже, чем Д16АМ.

Тем, не менее, за счет исключения соединительных полос и крепежных элементов, предлагаемый вариант конструкции обтекателя помимо роста технологичности по отношению к базовому, характеризуется и меньшей массой.

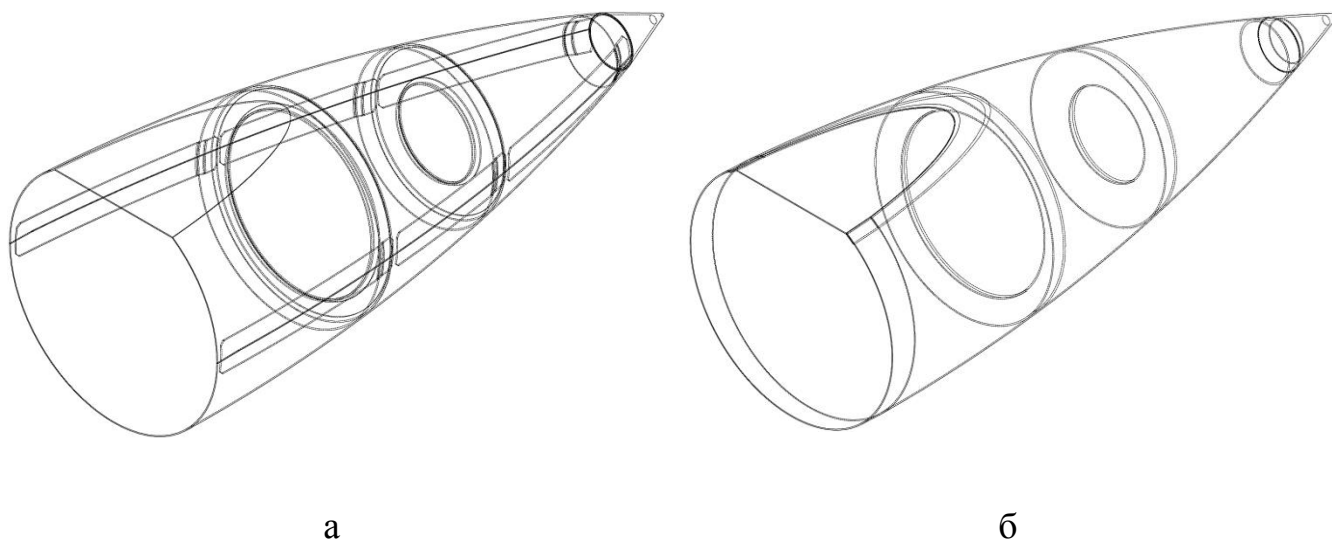


Рис. 3. Задний кок контейнера РЭП. Исходная (а) и предлагаемая (б) конструкции.

Крепежные элементы условно не показаны

Пример 2.

Рассматривается авиационная противокорабельная ракета, на рисунке 4, в центре. Предназначена для поражения кораблей. Используется в составе авиаударного комплекса. Изделие выполнено по конструктивной схеме «полумонок»: силовая обшивка, подкрепленная шпангоутами.



Рис. 4. Противокорабельная ракета. Фото В. Кузьмина

На основании разработанного метода и алгоритмов выявлены «проблемные» конструкции изделия:

- а. Конструкция двигательного отсека, а именно шпангоутов крепления к узлам подвеса носителя.

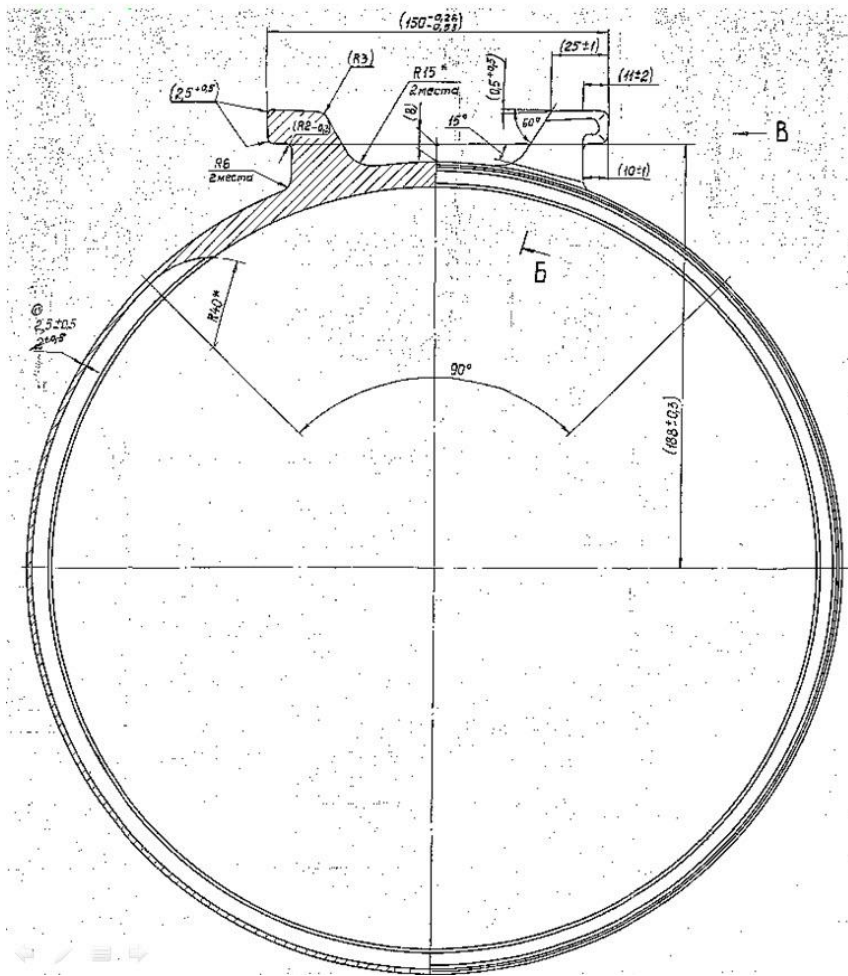
Варианты конструкторско-технологических решений шпангоута приведены на рисунке 5. Вариант №1 – исходная конструкция, характеризующаяся длительным циклом изготовления, обусловленный тяжелыми условиями обработки резанием жаропрочной стали штампованной заготовки.

Таким образом направления поиска эквивалентных вариантов лежат на пути уменьшения доли работ по обработке резанием, что достигается рациональным выбором заготовки.



Рис. 5. Варианты конструкции шпангоута двигательного отсека противокорабельной ракеты. Вариант №1 – исходная конструкция. Вариант №2 – доработанная конструкция силами специалистов завода. Вариант №3 – предлагаемая конструкция

На рисунке 6 приведена исходная конструкция. Шпангоут выполнен цельнометаллическим путем удаления материала. Заготовка штамповка, или поковка. Примечателен показатель КИМ (коэффициент использование материала), на практике равный 0,08.



Вариант №1:

Заготовка:

Штамповка по ТУ1-807-262-85

или

Поковка с 2-мя сварными швами
по образующей ХН68ВМТЮК-ВД

ТУ14-1-3759-84

Масса заготовки:

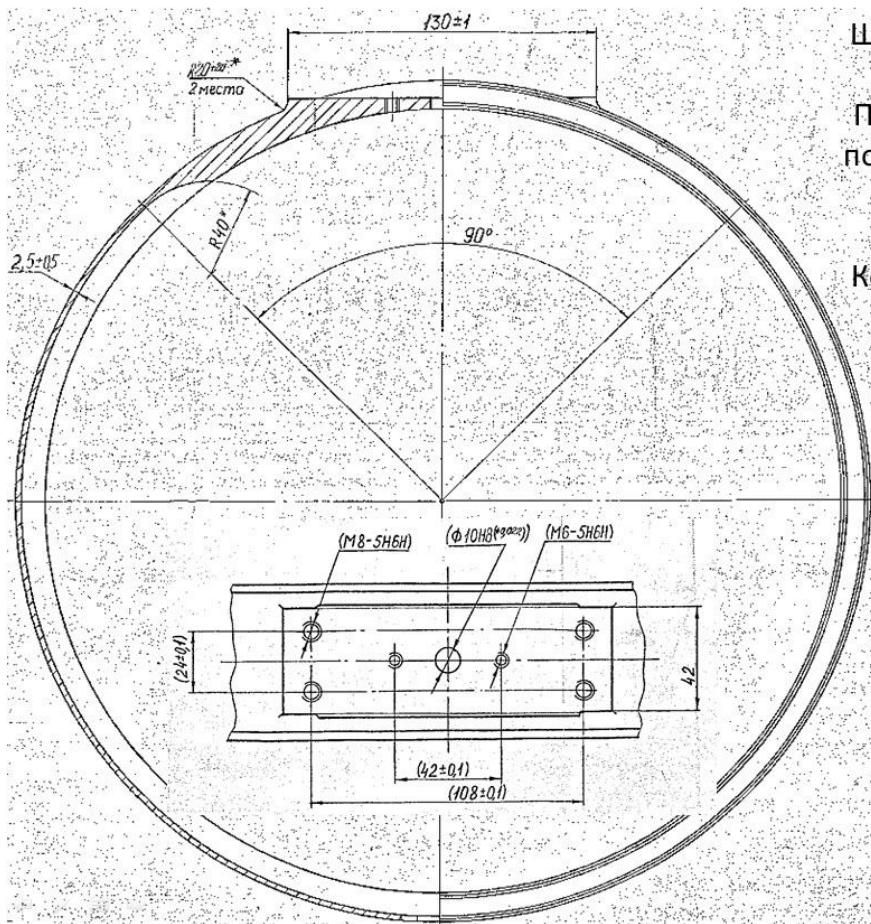
7,0 кг (КИМ не менее 0,15; 0,08)

Масса изделия: 2,8 кг



Рис. 6. Вариант №1 – исходная конструкция

На рисунке 7 приведена альтернативная конструкция. Шпангоут выполнен сборным из кольца и монтируемого по специальной площадке бугеля. Видно, что значительная доля механообработки исключена, о чем свидетельствует КИМ, равный 0,45. Следует отметить, что при современном предложении высокопроизводительного механообрабатывающего оборудования и условий переработки стружки, КИМ не является критерием выбора конструкторско-технологического решения. Однако в данном случае, КИМ выбран в качестве критерия по причине тяжело поддающегося механической обработке резанием жаропрочного сплава. Заготовка, при таком варианте, имеет также меньшую стоимость.



Вариант №2:
 Заготовка:
 Штамповка по ТУ1-807-262-85
 или
 Поковка с 2-мя сварными швами
 по образующей ХН68ВМТЮК-ВД
 ТУ14-1-3759-84
 или
 Кольцо цельнокатаное по ОСТ1
 90396-91

Масса заготовки:
 6,5 кг (КИМ не менее 0,45)
 Масса изделия: 2,9 кг



Рис. 7. Вариант №2 – доработанная конструкция силами специалистов завода.

Предлагаемый вариант №3, рисунок 8, 9 характеризуется еще большим приближением кольцевой заготовки к детали. Поскольку бугель обрабатывается и во втором, и в третьем вариантах, зона его расположения характеризуется сектором с углом 60 – 90° градусов, то целесообразно отнести обрабатываемый сектор к детали бугеля, что исключит обработку кольца по всему диаметру. Бугель в этом случае приваривается на кольцо.

На рисунке 10 приведены оценочные расчеты работы материала крепежных элементов для второго варианта и сварочного шва для предлагаемого третьего варианта. Условие равнопрочности выполняется с учетом ослабления сварочного шва.

На рисунке 11 приведены эпюры распределения напряжений и перемещений для одного из расчетных случаев нагружения шпангоута варианта №3. Расчеты показывают, что конструкция выдерживает нагрузку.

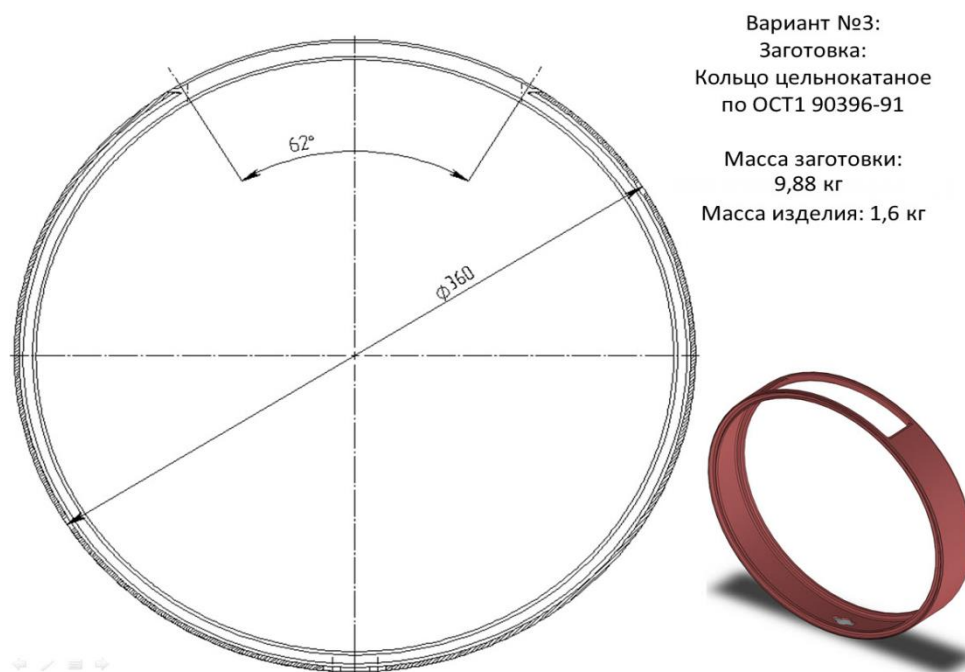


Рис. 8. Вариант №3 – предлагаемая конструкция, кольцо

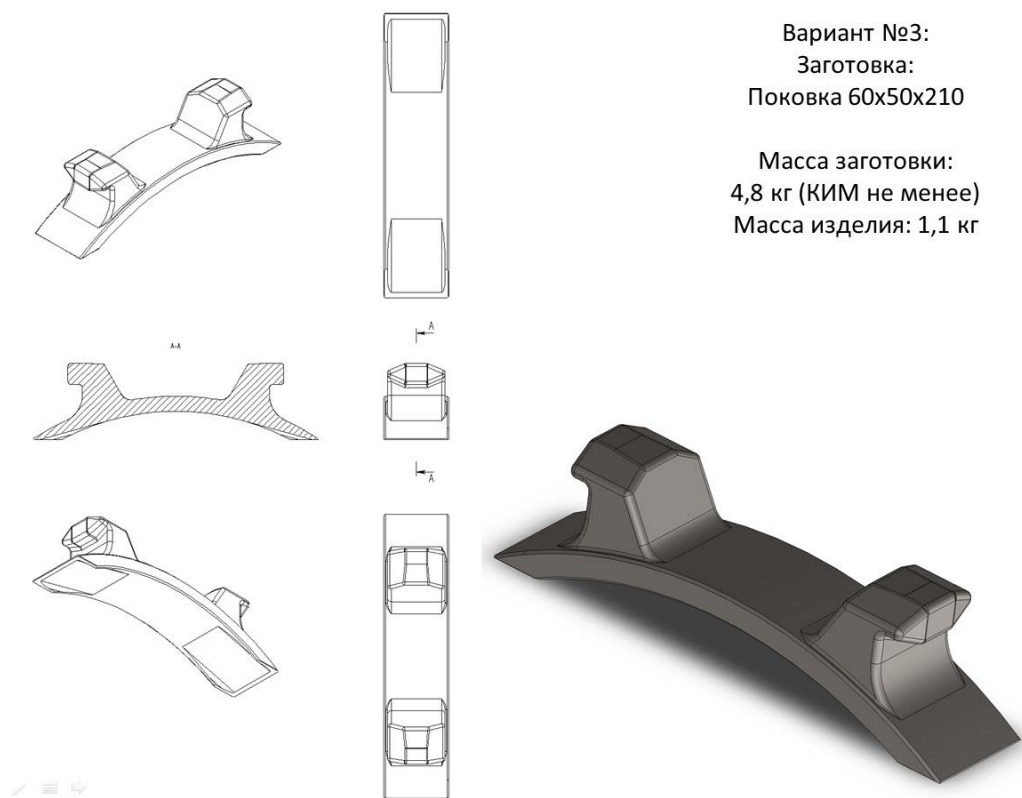
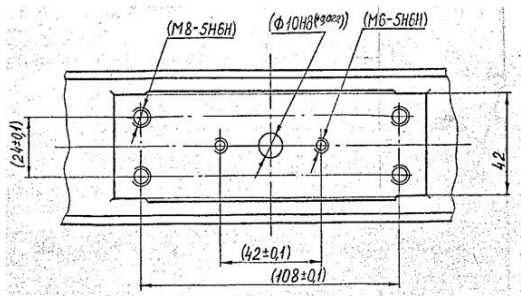


Рис. 9. Вариант №3 – предлагаемая конструкция, бугель

Вариант №2:
 Штифт $\varnothing 10$, Болт М8 – 4 шт., Винт М6 – 2 шт.
 На отрыв: $S = 336 \text{ мм}^2$
 На срез: $S = 650 \text{ мм}^2$



Вариант №3:
 Сварной шов $\varnothing 3$, $L = 0,5 \text{ м}$.
 На отрыв: $S = 1500 \text{ мм}^2$
 На срез: $S = 1500 \text{ мм}^2$

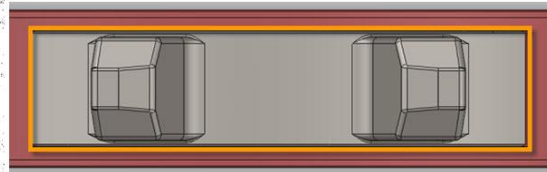


Рис. 10. Сравнение вариантов №2 и №3. Болтовое и сварное соединение.

Вариант №3:
 Нагрузка: $N_y = 5 \text{ ед.}$

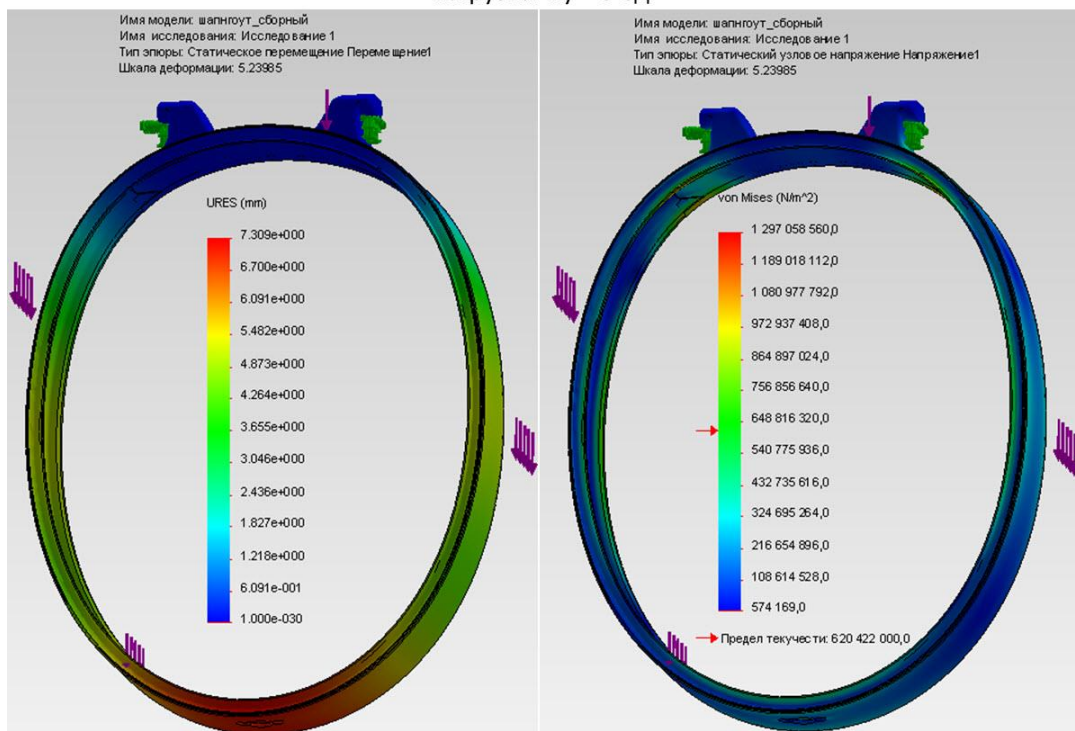
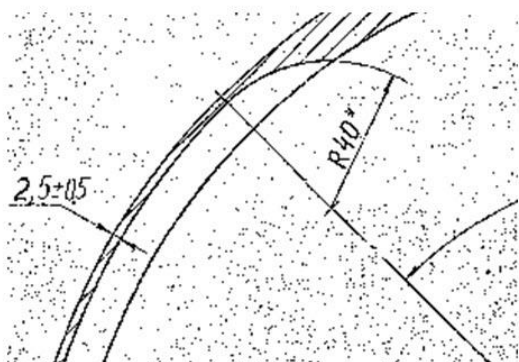


Рис. 11. Эпюры перемещений (слева) и напряжения (справа) для Варианта №3

Вариант №2:
Толщина: $2,5 \pm 0,5$



Вариант №3:
Толщина: 2,2-0,2

Увеличена толщина стенки шпангоута
с 2,5 до 4 мм
Увеличен радиус перехода от стенки к
внешней оболочке с 2 до 3мм



Рис. 13. Сравнение конструкций вариантов №2 и №3

Шпангоуты вариантов конструкций №2 и №3 на рисунке 13, имеют одинаковую массу. Перераспределение массы позволит значительно снизить трудоемкость обработки и сократить производственный цикл изготовления всего изделия.

Анализ полученных результатов

Анализ результатов показывает, что поиск решений во многом осложнен дискретным характером производства наукоемкой продукции. В связи с этим поиск универсального решения затруднен, однако сам подход, схематично представленный на рисунке 14, может быть использован для изделий аэрокосмической отрасли. Кроме того, решение задачи носит организационно-технический характер, поскольку пренебрежение «инженерной» составляющей в

организации материального потока в производственной системе приводит к потере эксплуатационных свойств изделия, что, очевидно приводит к аннулированию результатов всей деятельности.

Результат конструкторско-технологическое проектирования:

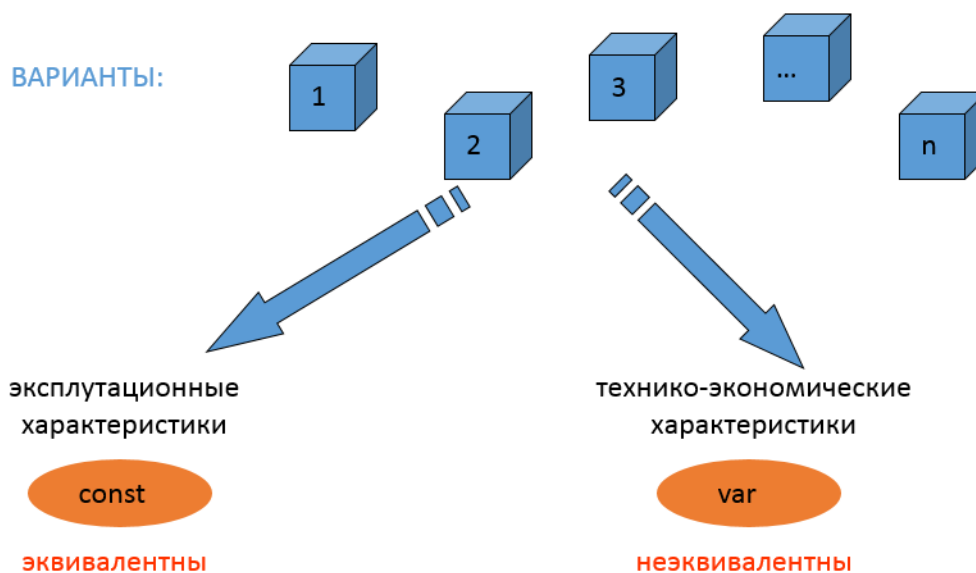


Рис. 14. Поиск эквивалентных альтернативных вариантов конструкторско-технологических решений. Схема. Модель принятия решений

Заключение

В работе предложена методология проектирования изделий с учетом возможности дискретного машиностроительного производства. Характер методологии предусматривает широкое применение программных средств и средств автоматизации. Поэтому актуальной является задача разработки программно-информационного комплекса поддержки принятия решений рассматриваемого процесса при разработке вариантов конструкторско-технологических решений.

Библиографический список

1. Леон Р., Шумейкер А., Какар Р., Кац Л., Фадка М., Тагути Г., Спини Д., Грико М., Лин К., Назарет У., Клиндер У., Нэйр В., Дехнад К., Прегибон Д.

- Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути: Пер с англ. – М.: Сейфи, 2002. – 381 с.
2. Детмер У. Теория ограничений Голдратта. Системный подход к непрерывному совершенствованию: Пер с англ. – М.: Альпина Паблишер, 2010. – 448 с.
 3. Васильев М.С., Кабанов А.А., Кулик Ю.П., Петров К.П. Сетевые графики – инструмент исследования издержек производства // Третья Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности». Москва, 23-25 ноября 2005 г. С. 453-458.
 4. Кабанов А.А. Оценка эффективности функционирования производственной системы дискретного машиностроительного производства с применением методов сетевого и имитационного моделирования // 14-й Международный научно-технический семинар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте». Киев, 24-28 февраля 2014 г. С. 78-80.
 5. Кабанов А.А. Имитационное моделирование в производстве авиационных и ракетно-космических систем. Что предшествует эксперименту? // Электронный журнал «Труды МАИ», выпуск № 65: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35910> (дата публикации 19.06. 2013 г).
 6. Кан С.Н., Свердлов И.А. Расчет самолета на прочность. – М.: Машиностроение, 1966. – 520 с.
 7. Архангельский И.И., Афанасьев П.П. Проектирование зенитных управляемых ракет. / Под. ред. И. С. Голубева. – М.: Изд-во МАИ, 1999. - 728 с.
 8. СНиП II-23-81*. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции. – М.: ФГУП ЦПП, 2006. – 90 с.
 9. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. – Ленинград, Машиностроение, 1979. – 520 с.