

К вопросу оптимизации и проектирования деталей, изготавливаемых вытяжкой эластичной средой, с применением реконструкции

Мироненко В.В.*, Мацуро Е.А.**

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия

**e-mail: mironenko_vv@istu.edu*

***e-mail: macuro@rambler.ru*

Аннотация

На примере авиационной детали классической формы под вытяжку коробчатого типа рассмотрена оптимизация процесса вытяжки эластичной средой с использованием крышки с гарантированным зазором, а также классическая оптимизация детали на основе моделирования и оптимизация на основе технологии «технологической реконструкции». Представлены схемы классической вытяжки эластичной средой и вытяжки с гарантированным зазором. Освещены основные аспекты использования технологии NURBS для восстановления формы детали с конечно-элементной сетки. Показаны проблемы, возникающие при классической оптимизации с использованием моделирования и пути их решения с применением «технологической реконструкции». Приведены результаты расчета в виде градиентов распределения: пластических деформаций; толщин и зон качества основываясь на кривой предельных деформаций Келлера — Гудвина.

Ключевые слова: вытяжка с гарантированным зазором, вытяжка эластичной средой, технологическая реконструкция.

Введение

В современном авиационном заготовительно-штамповочном производстве существуют серьезные проблемы, связанные с оптимизацией деталей, получаемых глубокой вытяжкой и проектированием таких деталей с учетом возможностей их изготовления. При решении задач оптимизации имеющейся формы авиационной детали, которую невозможно изготовить без дефектов, возникает вопрос - как изменить форму детали чтобы гарантировано избежать дефектов при изготовлении и сохранить ее функциональные свойства? В данном случае проектированием решается сложная задача поиска формы детали, которую можно было бы получить при формообразовании без дефектов и в последующем избежать оптимизации.

Проблема оптимизации формы имеющихся авиационных деталей и проектирование авиационных деталей с учетом аспектов ее формообразования является актуальной проблемой т.к. игнорирование этих проблемы ведет к удорожанию изготовления деталей и повышения ее себестоимости.

Решение данной проблемы частично помогает снять имитационное моделирование технологического процесса. Однако моделирование дает ответ на вопрос о возможности изготовления авиационной детали при данной технологии, но не может дать ответ на вопрос оптимизации детали, при которой изготовление проходило бы без дефектов. В данном случае, имитационное моделирование может стать основой для применения технологии «технологической реконструкции», которая поможет решить данную задачу. Новизной предлагаемой технологии заключается в использовании имитационного моделирования как инструмента для расчета рациональной геометрической формы авиационных деталей с точки зрения

формообразования и реконструкция данной формы с помощью технологии построения набора базисных поверхностей.

Исследуемая деталь

На примере авиационной детали типа «Короб» (Рис.1) рассмотрена оптимизация процесса вытяжки эластичной средой, классическая оптимизация детали на основе моделирования и оптимизация на основе технологии «технологической реконструкции».

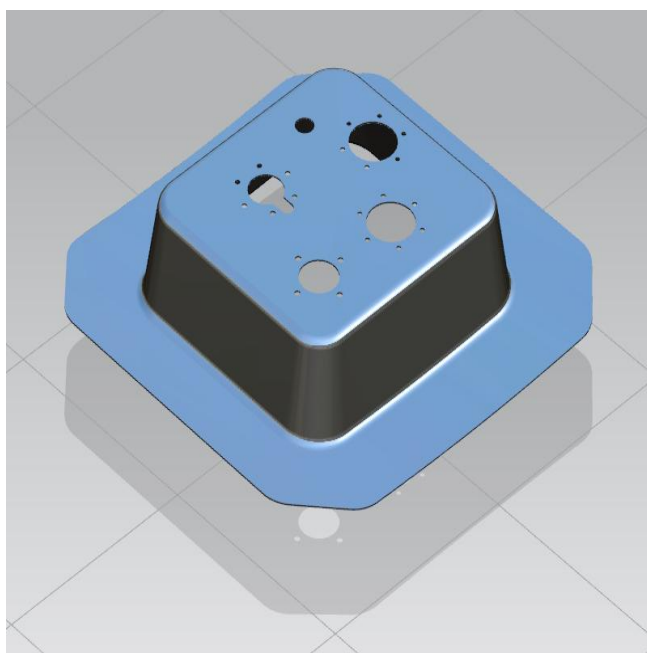


Рис.1 – Деталь типа «Короб»

Авиационная деталь имеет классическую форму деталей под вытяжку коробчатого типа толщиной 1,2 мм. Габариты детали (350 x 360 x 65 мм.) не превышают размеров рабочей поверхности столов прессов для эластоформования на сегодняшний день. Материал детали - коррозионностойкая сталь 12X18Н10Т. Вытяжка будет проводиться гидро-эластоформованием на прессах типа QFC фирмы Quintus Technologies. Минимальная допустимая толщина после формообразования –

0,96 мм. Теоретическая масса (масса с учетом того что толщина по всей детали постоянна и равна 1,2 мм.) – 1,47 кг.

Для технологического моделирования использован программный комплекс RAM-STAMP французской фирмы ESI Group.

Модель материала заготовки 12Х18Н10Т задана следующими параметрами:

- модуль Юнга – 184 ГПа;
- коэффициент Пуассона – 0.27;
- плотность – 7.8 кг/мм³;
- коэффициенты анизотропии r_{00} , r_{45} , r_{90} – 0.5089, 1.2808, 0.6654;
- пластическая часть кривой течения задана функцией «Krupkowsky law» [1],

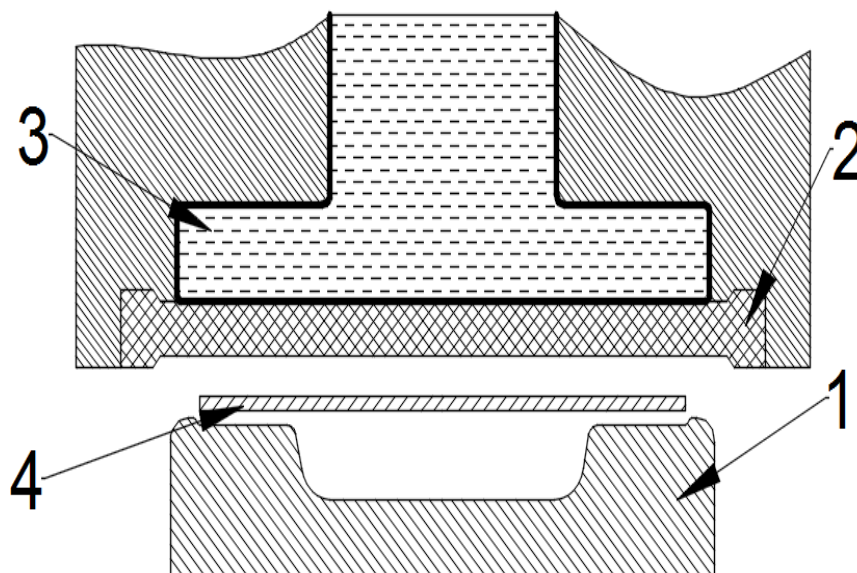
имеющей вид: $\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n$. Константы функции для материала 12Х18Н10Т: $K=1,44504$ ГПа, $n=0.6138$, $\varepsilon_{ps0} = 0.0271$.

Классическая схема вытяжки эластичной средой

Классической проблемой, возникающей при вытяжке глубоких авиационных деталей эластичной средой, является так называемый «отрыв дна». Это происходит в результате:

- зажимания заготовки в зоне фланцевой части детали на оснастке;
- большого коэффициента трения, препятствующего перемещению заготовки в очаг деформации;
- больших габаритов заготовки, превышающих размеры развертки детали.

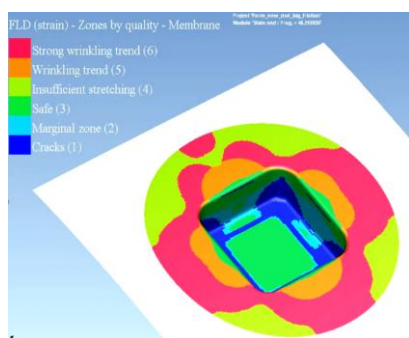
Было проведено моделирование детали типа «Короб» используя заготовку диаметром 700 мм. по классической схеме вытяжки деталей эластичной средой (Рис.2).



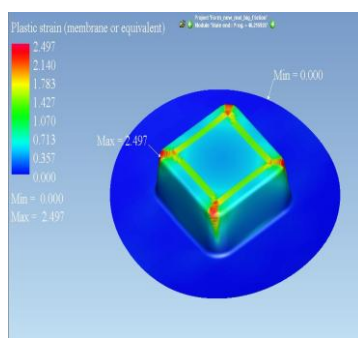
1 – жесткая матрица; 2 – защитная эластичная диафрагма;
3 – жидкость в эластичном контейнере; 4 – заготовка.

Рис.2 – Классическая схема вытяжки эластичной средой

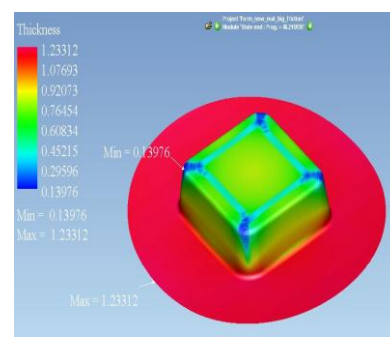
Моделирование данного процесса показало дефект «отрыва дна» (Рис.3):



Синие зоны - зоны
опасных деформаций



Пластическая
деформация (красный
цвет) – 249 %



Минимальная толщина
(синий цвет) – 0,139 мм.,
утонение – 88 %

Рис.3 – Результаты моделирования

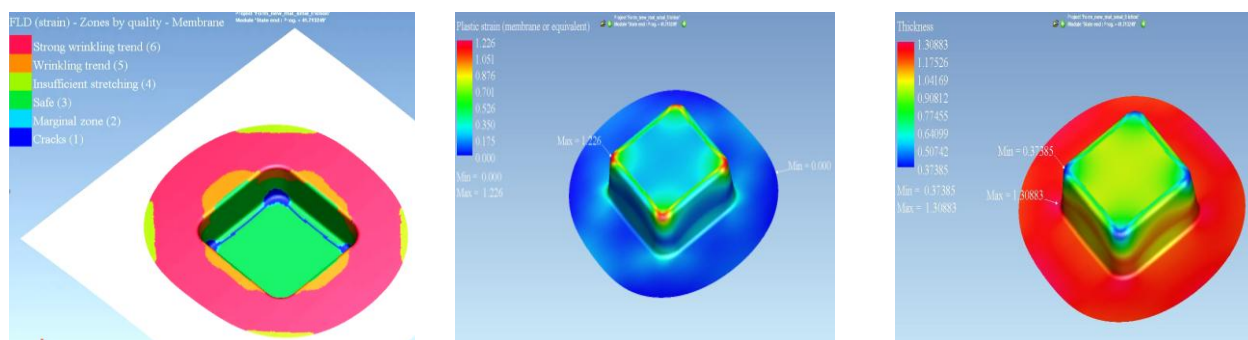
- распределением предельного состояния материала выявились зоны опасных деформаций (в данных зонах велика вероятность разрыва);
- чрезмерным утонениям;
- большими деформациями, превышающими деформационную способность материала.

Уменьшение трения (коэффициент трения Амонтона — Кулона снижен с 0,12 до 0.05) привело к:

- снижению площади зон опасных деформаций на модели распределения предельного состояния материала (Рис.4);

- уменьшению утонения и деформаций (Рис.4).

Однако это не решило проблему с появлением дефекта отрыва дна.



Синие зоны - зоны
опасных деформаций

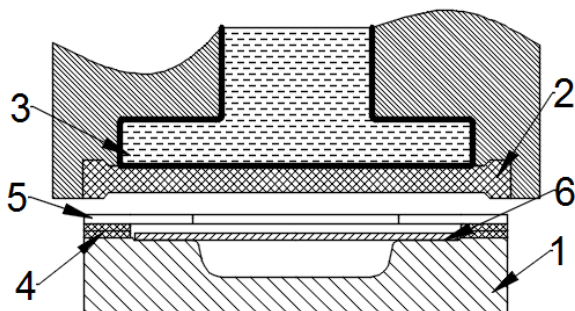
Пластическая
деформация (красный
цвет) – 122 %

Минимальная толщина
(синий цвет) – 0,373 мм.,
утонение – 68 %

Рис.4 – Результаты моделирование с уменьшенным трением

Вытяжка с гарантированным зазором.

Так как снижение коэффициента трения не устранило дефект «отрыва дна» необходимо обеспечить движение фланца. Однако, свободное движение фланца приводит к интенсивному гофрообразованию и как следствие замедляет и останавливает движение фланца. Для этого предлагается использовать технологию вытяжки с гарантированным зазором. Схема данного процесса показана на рис.5.



1 – жесткая матрица; 2 – защитная эластичная диафрагма;

3 – жидкость в эластичном контейнере; 4 – поддерживающий трафарет;

5 – крышка; 6 – заготовка

Рис.5 – Схема вытяжки с гарантированным зазором

Суть технологии заключается в том, что поддерживающий трафарет и крышка обеспечивают зазор равный трем толщинам заготовки и как следствие фланец может свободно перемещаться при формообразовании. Когда на фланце образуются гофры, они не могут стать очень высокими из-за крышки. Для устранения гофров, образующихся во время формообразования необходимо разбить процесс на переходы типа: формовка; посадка гофров. Формовка включает в себя формообразование заготовки вместе с крышкой и трафаретом до определенного давления; посадка гофров включает себя установку крышки без трафарета поверх заготовки с гофрами и формообразование тем же давлением что и при формовке. В

результате посадки гофров будет устранять гофры и не приводить к появлению новых ввиду недостаточности давления [6].

Предлагается разбить процесс на переходы как показано на графике давления (Рис.6). При чем на пятом переходе на делается посадка гофр, только формовка на максимальное давление (80 МПа).



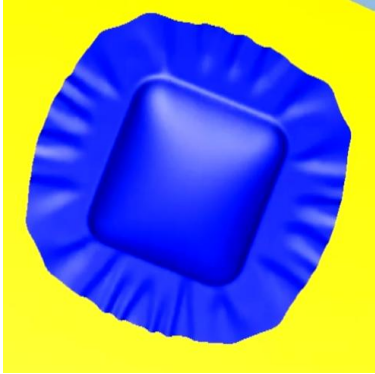
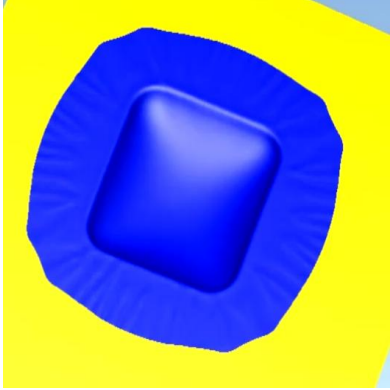
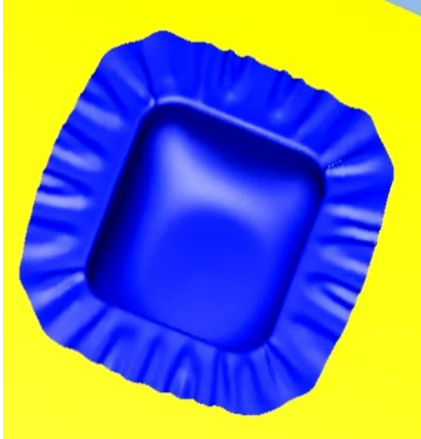
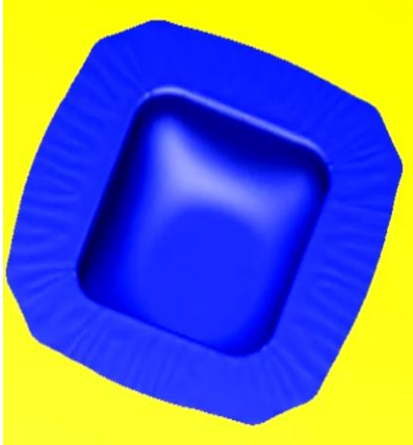

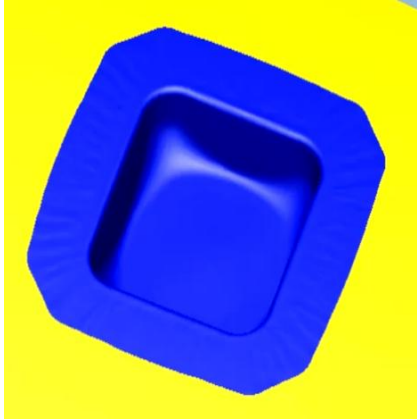
Рис.6 – График давления


Так же, для увеличения способности фланца к движению в очаг деформации форма заготовки была рассчитана исходя из формы детали и уменьшена. Табл.1 показывает эффекты, возникающие на этапах формовки и посадки гофров при моделировании и форму фланца на заготовке.

Таблица 1

Форма заготовки по переходам при формообразовании

Переходы	Формовка	Посадка гофров

Переходы	Формовка	Посадка гофров
1		
2		
3		

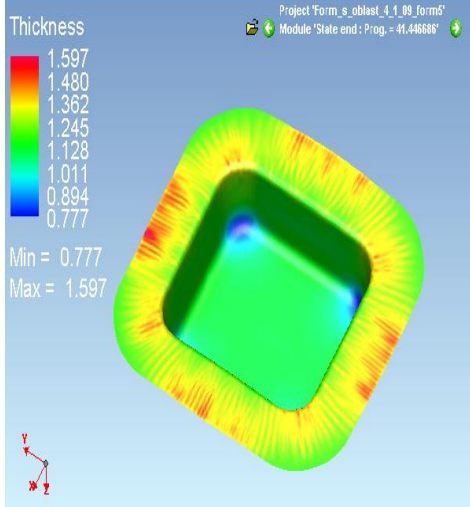

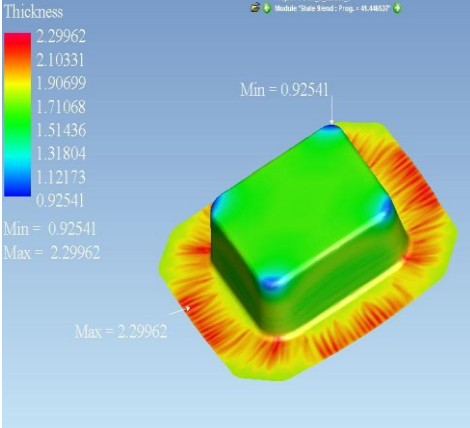
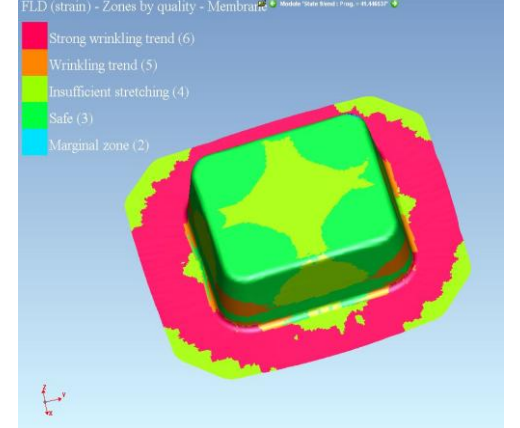
Переходы	Формовка	Посадка гофров
5		-

С данными условиями было проведено моделирование с толщиной заготовки 1,2 мм. В результате распределение предельного состояния материала не показало дефекта типа «отрыв дна», но минимальная толщина на распределение толщин получилась меньше требуемой (равной 0,96 мм.) на 25 %. Что не приемлемо по требуемым параметрам. Для повышения минимальной толщины самое логичное и простое было увеличить толщину заготовки до 1,8 мм. Моделирование этого процесса также не дало нужного эффекта (минимальная толщина осталась меньше требуемой на 5 %). К тому же резко возросла масса детали относительно теоретической (равной 1,47 кг.) на 45% (равна 2,13 кг). Результаты моделирования показывает табл.2.

Таблица 2

Результаты моделирования формообразования с гарантированным зазором

Толщина заготовки	Распределение толщин	Распределение предельного состояния материала

Толщина заготовки	Распределение толщин	Распределение предельного состояния материала
1,2 мм.	 <p>Thickness</p> <p>1.597 1.480 1.362 1.245 1.128 1.011 0.894 0.777</p> <p>Min = 0.777 Max = 1.597</p> <p>Минимальная толщина (синий цвет) – 0.77 мм.</p>	 <p>FLD (strain) - Zones by quality - Membrane</p> <p>Strong wrinkling trend (6) Wrinkling trend (5) Insufficient stretching (4) Safe (3)</p> <p>Синие зоны отсутствуют Трещин нет</p>
1,8 мм.	 <p>Thickness</p> <p>2.29962 2.10331 1.90699 1.71068 1.51436 1.31804 1.12173 0.92541</p> <p>Min = 0.92541 Max = 2.29962</p> <p>Минимальная толщина (синий цвет) – 0.92 мм.</p>	 <p>FLD (strain) - Zones by quality - Membrane</p> <p>Strong wrinkling trend (6) Wrinkling trend (5) Insufficient stretching (4) Safe (3) Marginal zone (2)</p> <p>Синие зоны отсутствуют Трещин нет</p>

Классическая оптимизация геометрии формы детали

Таким образом, приходим к выводу, что для увлечения минимального значения толщины необходимо оптимизировать деталь в районе радиусных переходов между стенками и дном детали. Однако тут же перед специалистом возникает вопрос – как это сделать. На данный момент в таких случаях прибегают к простому увеличению радиуса. Радиус был изменен с 7 мм. на 16 мм. (Рис.7).

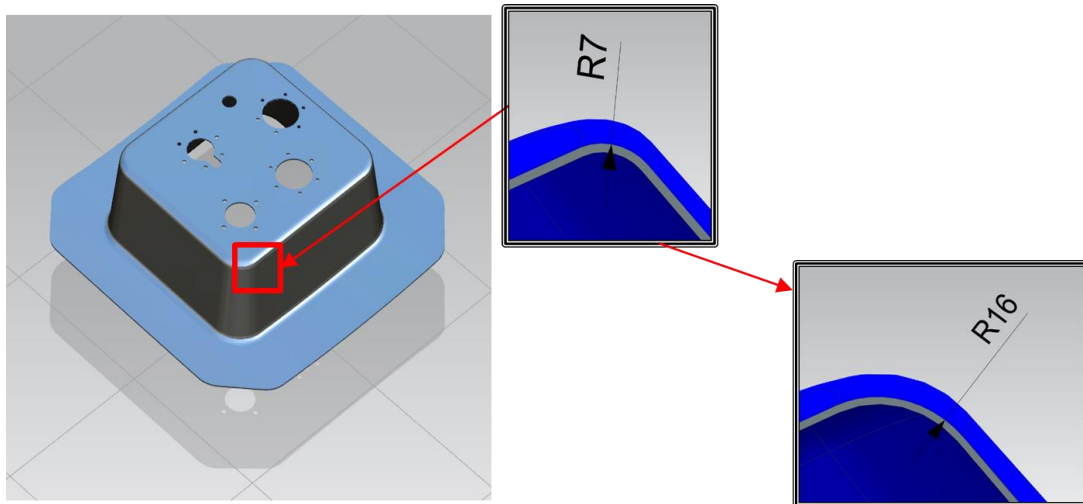
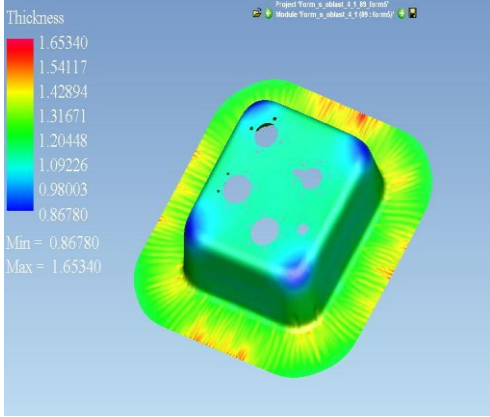
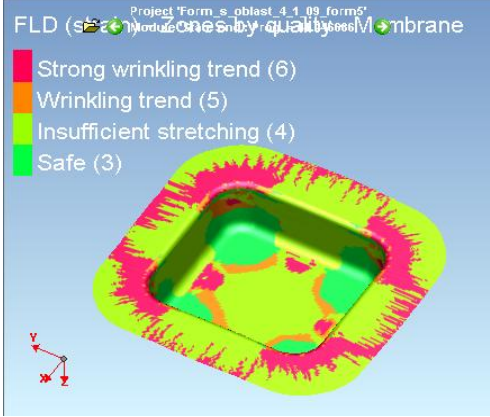
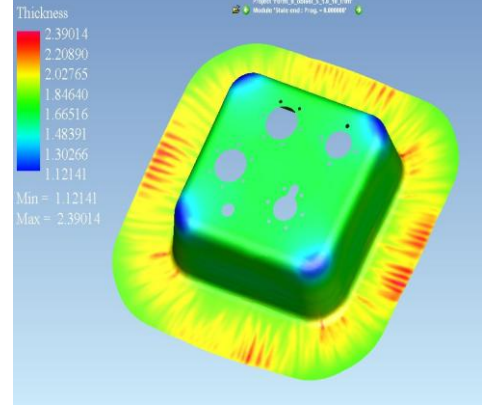
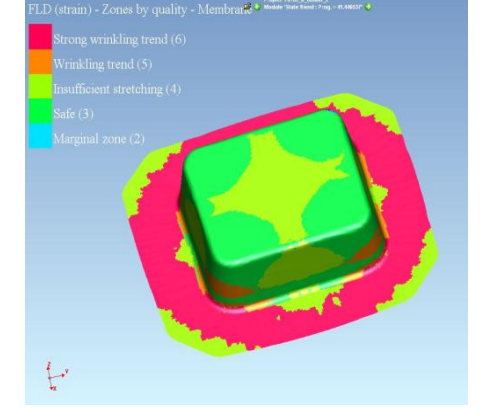


Рис.7 – Оптимизация формы детали

Моделирование формообразования оптимизированной авиационной детали с увеличенным радиусным переходом показало неэффективность оптимизации. При толщине заготовки 1,2 мм. минимальная толщина меньше требуемой на 13 %, а при толщине заготовки 1,8 мм. больше требуемой на 17 %, но масса возросла на 50 % относительно теоретической (равна 2,21 кг). Результаты моделирования оптимизированной детали показывает табл.3.

Результаты моделирования формообразования с гарантированным зазором
оптимизированной детали

Толщина заготовки	Распределение толщин	Распределение предельного состояния материала
1,2 мм.	 <p>Thickness</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.65340 1.54117 1.42894 1.31671 1.20448 1.09226 0.98003 0.86780 <p>Min = 0.86780 Max = 1.65340</p>	 <p>FLD (strain) - Zones by quality - Membrane</p> <ul style="list-style-type: none"> Strong wrinkling trend (6) Wrinkling trend (5) Insufficient stretching (4) Safe (3)
1,8 мм.	 <p>Thickness</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.39014 2.20890 2.02765 1.84640 1.66516 1.48391 1.30266 1.12141 <p>Min = 1.12141 Max = 2.39014</p>	 <p>FLD (strain) - Zones by quality - Membrane</p> <ul style="list-style-type: none"> Strong wrinkling trend (6) Wrinkling trend (5) Insufficient stretching (4) Safe (3) Marginal zone (2)

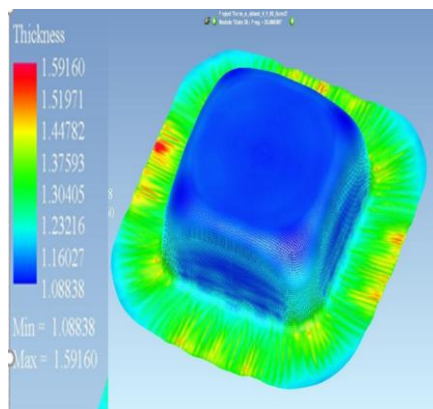
Оптимизация по технологии «технологической реконструкции»

Таким образом моделирование исходной и оптимизированной детали показывает, что набор чрезмерный толщин фланца происходит при посадке гофр и

сопровождается утонением в радиусных переходах на дне детали. Увеличение толщины ведет к увеличению массы. Гофры образуются в результате формообразования радиусных переходов на дне по углам на конечных этапах формообразования. И так как формообразование детали после касания дна оснастки идет от центра к углам (табл.1), необходимо чтобы в углах были интегральные радиусы.

Единственное условие при задании такого рода радиусов является неизменность формы дна детали, имеющего отверстия. Основной проблемой также, как и при классической оптимизации является сложность прогнозирования бездефектного формообразования с выбранными радиусами детали и удовлетворения ее требуемым параметрам. В данном случае и рекомендуется применить технологию «технологической реконструкции».

Суть технологии «технологической реконструкции» заключается в следующем - при моделировании формообразования заготовка меняет свою форму с плоской до той, которая задана оснасткой. Приближаясь к форме оснастки, заготовка описывает конечно-элементной сеткой наилучшие формы интегральных радиусов при формообразовании с точки зрения деформирования (табл.1). Остается только выбрать определённый шаг, при котором на с будет устраивать минимальная толщина и отформованная площадь плоского дна для отверстий. Такой формой была выбрана форма, представленная на рис.8. Форма искалась в процессе моделирования неоптимизированной детали из заготовки толщиной 1,2 мм.



Минимальная толщина (синий цвет) – 1,088 мм.

(больше требуемой на 15 %)

Рис.8 – Форма детали с интегральными радиусам

Однако эту форму необходимо преобразовать в геометрическую модель т.к конечно-элементная сетка не воспринимается CAD системами как целостный объект а выглядит лишь как облако точек. Для этого рекомендуется триангулировать сетку и преобразовать ее в геометрический фасет в формате *.stl. (т.е после этого все элементы на конечно-элементной сетки станут треугольниками). После этого этот геометрический фасет можно загрузить в любую CAD систему (в нашем случае была выбрана система Siemens NX 10) (Рис.9).

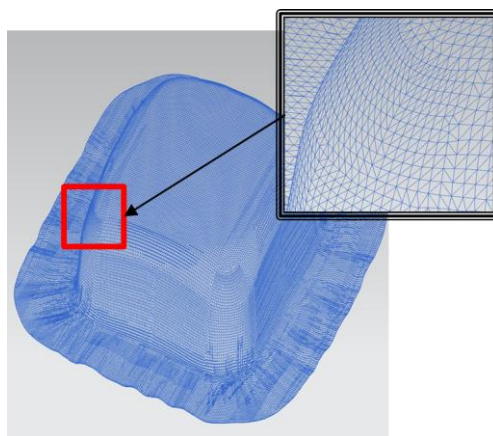


Рис.9 – Триангуляционный фасет в системе Siemens NX 10

Для реконструирования поверхности фасета использовалась технология NURBS (Non-uniform rational B-spline) [2]. Технология NURBS заключается в построении сплайнов на основе фасетного тела. Сплайны должны образовывать замкнутый контур определенного примитива (прямоугольного либо треугольного). Такая технология очень похожа на построение конечно-элементной сетки второго порядка, с тем различием что размер каждой поверхности различен. Суть сводится к тому, что технология NURBS должна представить фасет в наборе базисных поверхностей [3]. Основным достоинством данного метода является максимальная точность при реконструкции интегральных поверхностей. Результатом применения данной технологии реконструкции является внутренняя поверхность детали без фланца, где и находятся интегральные радиусы (Рис.10).

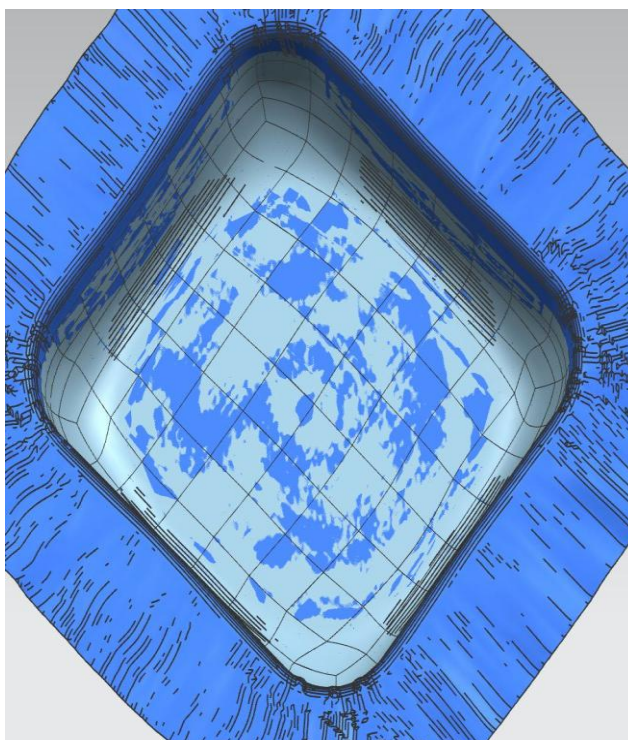
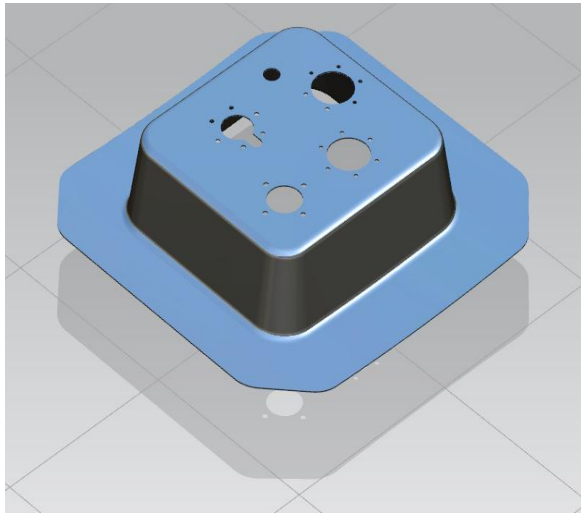


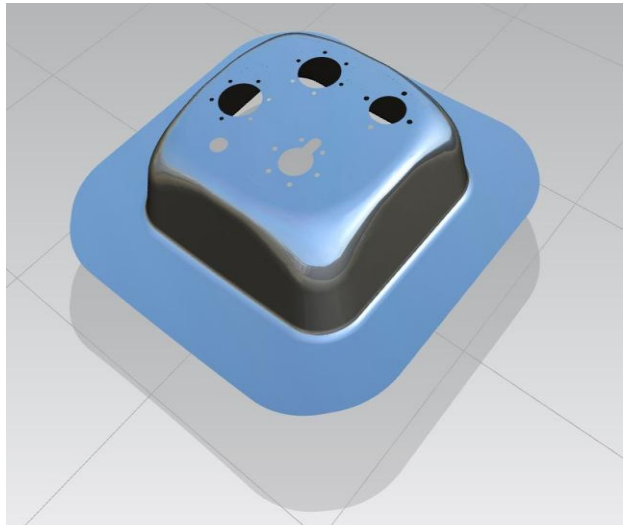
Рис.10 – Восстановленные поверхности по технологии NURBS

На основе этой поверхности с интегральными радиусами был получен оптимизированный КЭМ авиационной детали. Показано на рис.11, исходный КЭМ

детали и КЭМ детали оптимизированной по технологии «технологической реконструкции».



Исходный КЭМ



КЭМ детали оптимизированной по технологии «технологической реконструкции»

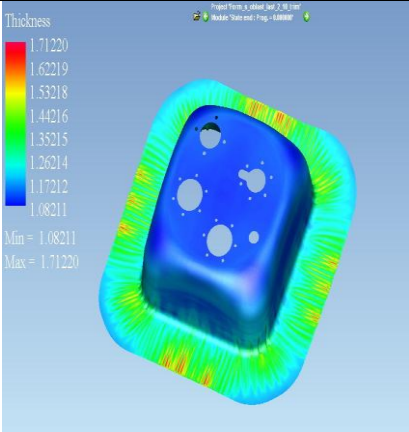
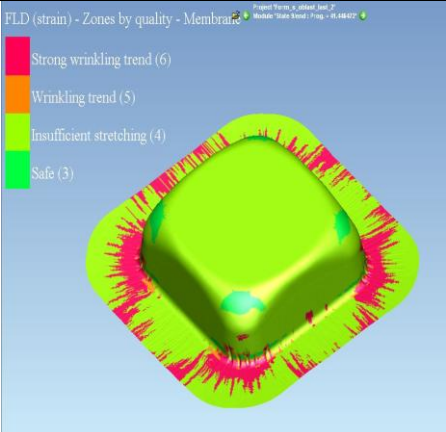
Рис.11 – Сравнение исходного и оптимизированного КЭМ

Последующие моделирование формообразования оптимизированной авиационной детали по технологии вытяжке с гарантированным зазором из заготовки 1,2 мм. показало, что минимальная толщина не меньше требуемого значения (0,96 мм.) и масса оказалась равна теоретической (1,47 кг.) (табл.4).

Таблица 4

Результаты моделирования формообразования с гарантированным зазором оптимизированной детали по технологии «технологической реконструкции»

Толщина заготовки	Распределение толщин	Распределение предельного состояния материала

<p>1,2 мм.</p>	 <p>Thickness</p> <p>1.71220 1.62219 1.53218 1.44216 1.35215 1.26214 1.17212 1.08211</p> <p>Min = 1.08211 Max = 1.71220</p> <p>Минимальная толщина (синий цвет) – 1.082 мм.</p>	 <p>FLD (strain) - Zones by quality - Membrane</p> <p>Strong wrinkling trend (6) Wrinkling trend (5) Insufficient stretching (4) Safe (3)</p> <p>Синие зоны отсутствуют Трещин нет</p>
----------------	--	--

Выводы

В результате, на примере авиационной детали типа «Короб» было показано применение технологии технологической реконструкции для задач оптимизации деталей с учетом деформационной способности материала и технологии формообразования. Аналогом на сегодняшний день разработанной технологии является технология оптимизации, основанная на геометрическом построении модели и простоте изменения формы детали. В статье было показано как данный подход устарел и не может решить проблемы возникающих при современном производстве авиационных деталей и что данный подход ведет к удорожанию производства деталей. Разработанная технология позволяет реконструировать форму заготовки на любом шаге формообразования. Использование данной технологии позволит уменьшить затраты на отработку процесса вытяжки эластичной средой на этапе оптимизации формы детали, а также позволит разрабатывать более технологичные формы деталей на этапе конструирования.

Библиографический список

1. Белых С.В., Кривенок А.А., Перевалов А.А. Обработка результатов контроля на ким деталей летательных аппаратов с использованием аппроксимации контура дугами // *Авиационная промышленность*. 2011. № 4. - С. 2.
2. Ахатов Р.Х., Однокурцев К.А. Формализованный метод выбора и анализа сборочных баз в самолетостроении // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2009. № 2 (23). С. 232 - 237.
3. Иванов Н.Н., Ржечицкий Э.П., Немаров А.А., Сысоев И.А., Иванчик Н.Н., Пинаев А.А. Исследование аэродинамических параметров и эффективности «сухой» газоочистки 6-ой серии электролиза филиала «Баз-Суал» // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*. 2015. Т. 1. С. 168 - 172.
4. Kondrat'ev V.V., Rzhchitskij E.P., Shakhrai S.G., Karlina A.I., Sysoev I.A. Recycling of electrolyzer spent carbon-graphite lining with aluminum fluoride regeneration // *Metallurgist*, 2016, vol. 60, no. 5-6, pp. 571 - 575.
5. Kondrat'ev V., Govorkov A., Lavrent'eva M., Sysoev I., Karlina A.I. Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU // *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 19, pp. 9979 - 9983.
6. Жиляев А.С., Говорков А.С. Формирование информационной модели изделия АТ в ПК «Система анализа ТКИ» // *Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные проблемы технических наук»*. Сборник статей. Уфа, 19 февраля 2014. С. 56 – 58.

7. Ахатов Р.Х., Говорков А.С., Жилиев А.С. Разработка и внедрение программного комплекса «система анализа технологичности конструкции изделий» при запуске в производство изделий // IV Международная научно-практическая конференция «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития». Статьи и тезисы докладов. Ульяновск, 16-17 октября 2014. С. 13 - 14.
8. Говорков А.С., Ахатов Р.Х. Анализ технологичности изделия авиационной техники на основе информационного образа изделия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 6-1. С. 285 - 292.
9. Лаврентьева М.В., Говорков А.С. Идентификация объектов структуры электронной модели изделия с помощью выявленных формализованных параметров из конструкторско-технологической среды // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85930>
10. Лаврентьева М.В., Чимитов П.Е., Карлина Ю.И. Реализация алгоритма распознавания 3d-модели изделий авиамашиностроения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 54 - 60.
11. Bobarika I., Demidova A., Bukhanchenko S. Hydraulic Model and Algorithm for Branched Hydraulic Systems Parameters Optimization // Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 2017, pp. 1522 - 1527.
12. Shahrai S.G., Sharypov N.A., Polyakov P.V., Kondratiev V.V., Karlina A.I. Quality of anode. Overview of problems and some methods of their solution Part 2. Improving the quality of the anode // International Journal of Applied Engineering Research, 2017, no.

21, pp. 11268 - 11278.

13. Baranov A.N., Kondratiev V.V., Ershov V.A., Judin A.N., Yanchenko N.I. Improving the Efficiency of Aluminium Production by Application of Composite Chrome Plating on the Anode Pins // International Journal of Applied Engineering Research, 2016, vol. 11, no. 22, pp. 10907 - 10911.

14. Cheslavskaya A.A., Mironenko V.V., Kolesnikov A.V., Maksimenko N.V., Kotov V.V. Choosing an Efficient Method for Forming Parts by Means of an Engineering Analysis Performed with the Use of a CAE System // Metallurgist, 2015, vol. 58, no. 11 - 12, pp. 1051 - 1059.

15. Khusainov R.M., Sabirov A.R., Mubarakshin I.I. Study of Deformations Field in the Working Zone of Vertical Milling Machine // Procedia Engineering, 2017, vol. 206, pp. 1069 - 1074.

16. Fabík R., Kliber J., Kubina T., Mamuzic I., Aksenov S.A. Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (FEM) // Metalurgija, 2012, vol. 51, no. 3, pp. 341 -344.

17. Chumachenko E., Aksenov S., Logashina I. Optimization of superplastic forming technology. METAL - 2012 // 21 st International Conference on Metallurgy and Materials. Conference proceedings, Osrrava, 2012, pp. 295 - 301.

18. Mokritskii B.Y., Vereshchagin V.Y., Mokritskaya E.B., Pyachin S.A., Belykh S.V., Vereshchagin A.S. Composite hard-alloy end mills // Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 12, pp. 1030 - 1032.

19. Белых С.В., Кривенок А.А., Мироненко В.В., Мишагин В.А. Определение положения пуансона в рабочем пространстве обтяжного пресса fet в процессе

технологической подготовки производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12 (83). С. 36 – 41.

20. Азаров Ю.А., Черноволов Р.А. Некоторые особенности моделирования динамической аэроупругости летательных аппаратов в трансзвуковых аэродинамических трубах // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87164>