Внедрение в производство деталей изделия SSJ-NEW технологии формообразования крупногабаритных обшивок двойной кривизны в условиях ограничений прессового оборудования

Кривенок А.А., Сарыков С.Э., Лиман П.Н.

Филиал ПАО «ОАК» - «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»
681018, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1.

Для снижения материальных и временных затрат на разработку и внедрение технологии изготовления обшивок двойной кривизны с использованием процесса обтяжки листовых заготовок разработаны математические модели и методики, позволяющие производить цифровое моделирование процесса формообразования и корректировать его на раннем этапе разработки технологии. При разработке технологии изготовления окантовки двери на самолет SSJ-NEW применялись новые подходы к моделированию процесса формообразования, которые позволили определить наиболее оптимальную стратегию обтяжки крупногабаритной заготовки на пределе кинематических возможностей пресса FET-1500. Разработанная технология позволяет в рамках вычислительного эксперимента провести отработочные итерации с переходом на реальную обтяжку в оптимальных технологических параметрах.

Ключевые слова: формообразование обтяжкой, пресс обтяжной, FET, кинематический анализ, обтяжной пуансон, прямая и обратная задачи кинематики.

Особенности технологической подготовки производства деталей из листовых заготовок с применением обтяжного оборудования

В производстве деталей летательных аппаратов, составляющих внешние поверхности аэродинамических обводов планера, широко применяется процесс формования листовых заготовок путем обтяжки. В процессе обтяжки плоская заготовка одновременно растягивается и изгибается по жесткому пуансону до полного её прилегания и достижения предела текучести в наименее растянутой зоне.

Технологическая подготовка производства листовых деталей летательных аппаратов переменной кривизны с применением современного обтяжного оборудования с ЧПУ включает [1]:

- выбор обтяжного оборудования;
- проектирование оснастки;
- разработка технологического процесса изготовления детали;
- разработка управляющих программ для ЧПУ обтяжного оборудования.

На начальном этапе разработки технологии, технологу необходимо предварительно проанализировать геометрию детали, разработать технологический процесс, с учетом специфических особенностей процесса обтяжки, проработать геометрию пуансона, на основании которого разработать управляющую программу. Разработка управляющих программ (УП) для ЧПУ обтяжного оборудования фирмы ACB выполняется с использованием CAM-системы S3F, которая выполняет моделирование процесса формообразования заготовки и транслирует траектории движения рабочих органов пресса в управляющий код для соответствующей модели пресса. На рисунке 1 приведена схема процесса разработки УП для обтяжного оборудования с ЧПУ с использованием CAM-системы S3F [2].

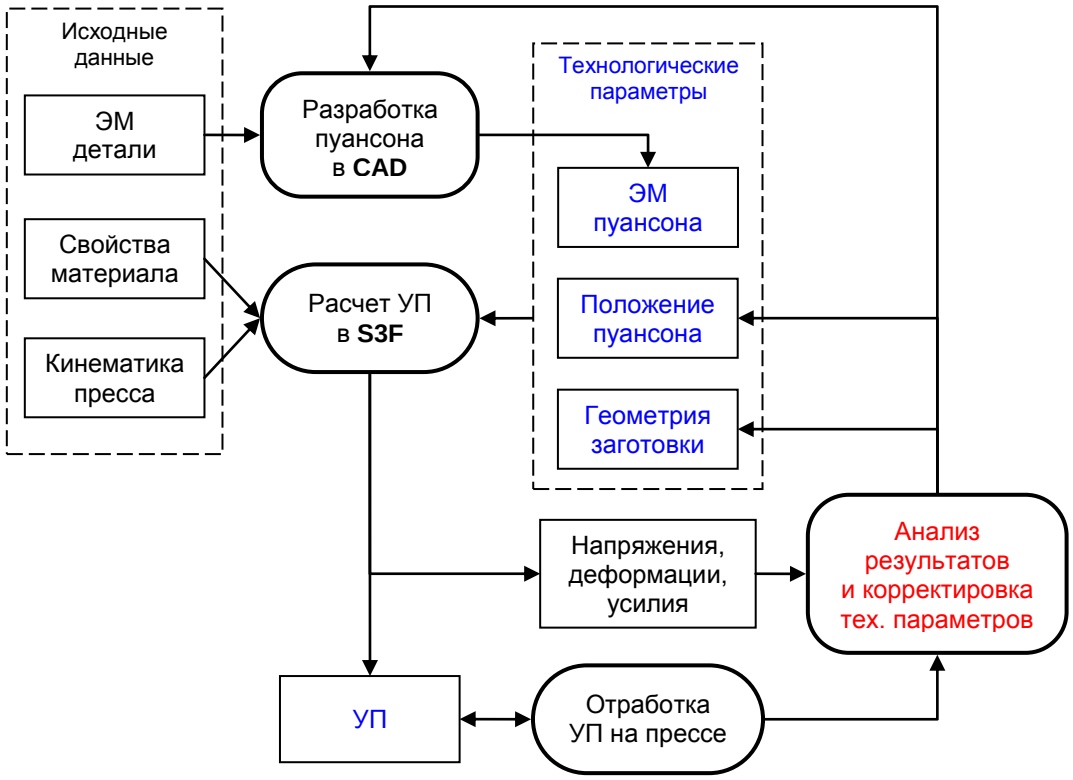


Рисунок 1 – Схема процесса разработки УП с использованием CAM-системы S3F

На траекторию движения рабочих органов пресса значительное влияние оказывают такие параметры как размеры заготовки и размещение пуансона на столе пресса. При проработке крупногабаритных деталей сложной пространственной формы, когда движение концов заготовки ограничено габаритами пресса, неправильно выбранные параметры размещения пуансона и размеров заготовки могут привести тому, что для движения концов заготовки не хватит кинематических возможностей пресса. Также существует опасность контакта зажимов пресса с технологической подставкой под пуансон, что в системе S3F, при расчете УП, никак не учитывается. Данное явление возможно выявить только при отработке процесса обтяжки реальной детали на прессе и, в случае выявления коллизии зажима и оснастки, потребуется дополнительный пересчет УП с новыми параметрами размера

заготовки или положения пуансона на столе пресса. Таким образом, можно сказать, что при отработке технологии формообразования крупногабаритных деталей сложной пространственной формы, ключевыми параметрами, влияющими на процесс, являются геометрия заготовки и пуансона, а также положение пуансона относительно стола обтяжного оборудования.

Кроме того, при разработке управляющих программ в CAM-системе S3F необходимо учитывать следующие ограничения:

– независимо от формы детали применяется схема обтяжки – изгиб с последующим растяжением;

– отсутствует возможность определить необходимый уровень деформаций при калибрующем растяжении (она задается пользователем).

– отсутствует возможность определения остаточных напряжений в детали после разгрузки (явление пружинения);

– отсутствует возможность корректировки траектории перемещения управляющих органов пресса.

Существующие в S3F ограничения по оценке и корректировке процесса обтяжки затрудняет разработку УП для конструктивно и технологически сложных деталей. Это может приводить к созданию неоптимального процесса обтяжки, в результате которого будут получаться детали, требующие большого объема доводочных работ. Разработка оптимальной технологии обтяжки листовых заготовок, опираясь только лишь на CAM-систему S3F, требует длительного много-итерационного поиска различных технологических параметров, включающего отработку на прессе и доработку оснастки. На качество проводимого технологом анализа результатов и корректировку технологических параметров (рис. 1) влияют недостаточная полнота информации, получаемая от S3F, а также длительность проверки результатов изменений (отработка процесса обтяжки).

Существует множество работ, в которых рассматриваются вопросы поиска оптимальных параметров процесса формообразования заготовок на обтяжном оборудовании, где кинематические схемы формообразования приведены в виде плоских механизмов [3-8]. Данные решения могут показать хороший результат при формообразовании относительно простых деталей с одинарной кривизной и симметрией в направлении обтяжки, но для более сложных деталей с двойной кривизной, не имеющих симметрии данные решения будут не столь эффективны [9-11].

Цели и задачи

Для снижения материальных и временных затрат на разработку и внедрение технологии изготовления обшивок двойной кривизны с использованием процесса обтяжки листовых заготовок предлагается в процесс разработки управляющих программ включить дополнительные инструменты численного моделирования,

которые обеспечат технолога полным объемом информации на ранних этапах разработки технологии (рис. 2).

Для реализации предложенного подхода необходимо решить следящие задачи:

1. Произвести кинематический анализ обтяжного пресса FET и разработать математическую модель позволяющую производить расчет УП для этого типа оборудования;

2. Разработать математическую модель процесса формообразования листовой заготовки методом обтяжки;

3. Произвести апробацию предложенных решений и внедрить их при разработке технологии изготовления окантовки двери.

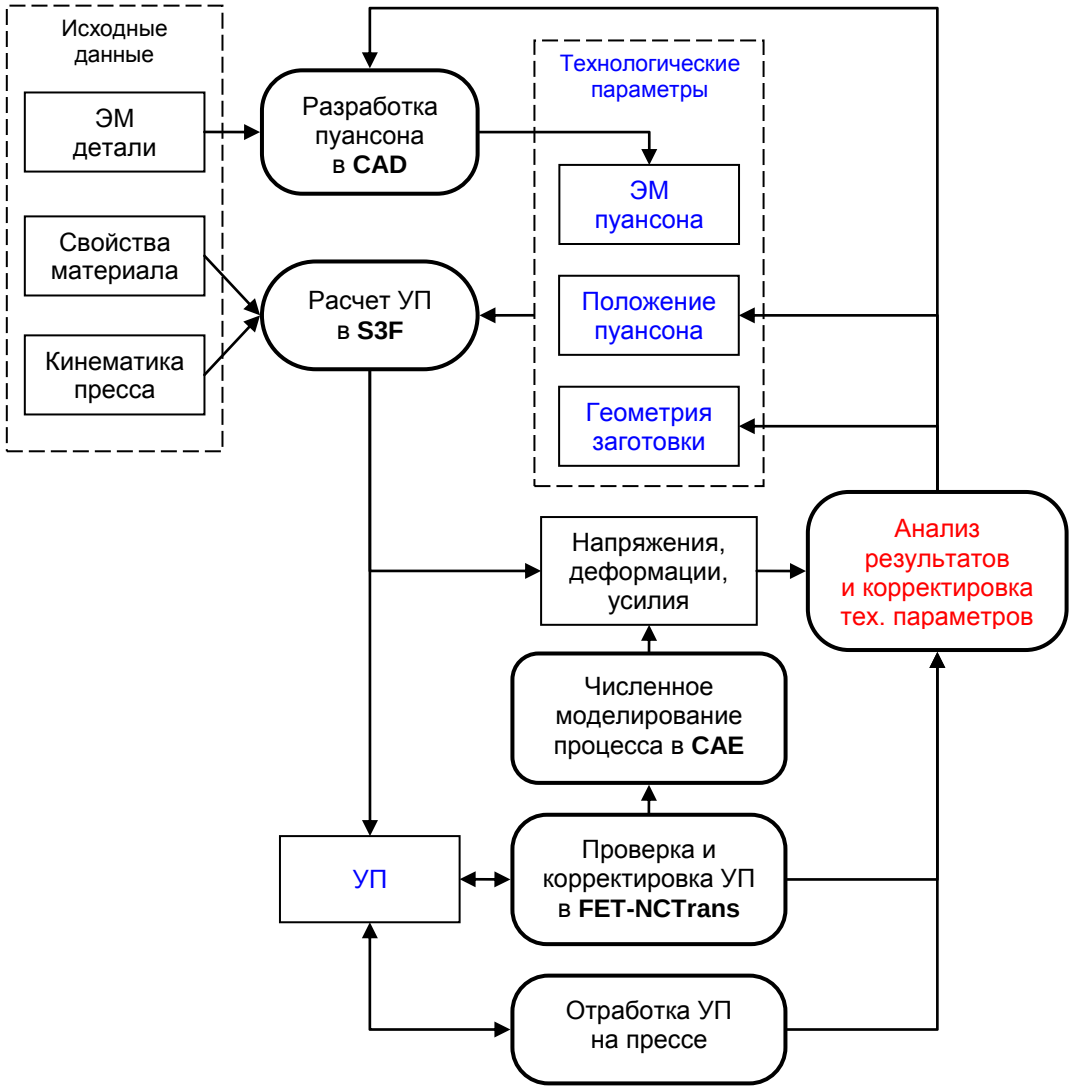
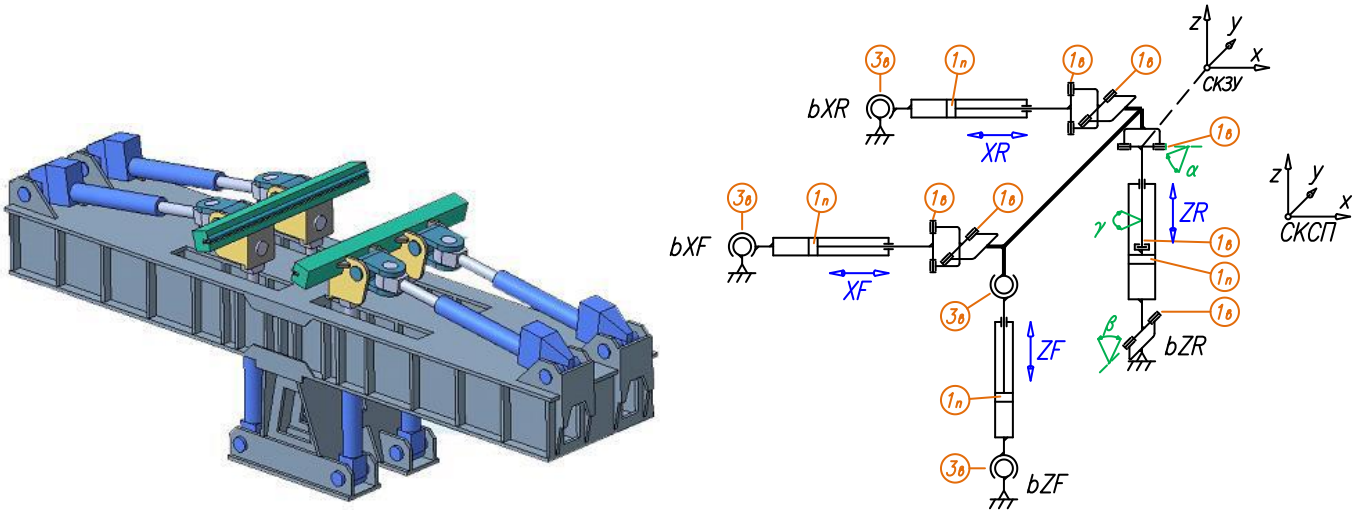


Рисунок 2 – Схема процесса разработки УП с её дополнительной проверкой и корректировкой

1. Кинематический анализ обтяжного пресса FET

В промышленности существует множество видов обтяжного оборудования с различной кинематикой позволяющей реализовывать различные режимы деформирования заготовок. Одним из наиболее подвижных, и вместе с тем сложных в управлении, является гидравлический пресс поперечной обтяжки типа FET. Его

параллельная кинематическая схема обеспечивает высокую подвижность зажимных устройств при высоких нагрузках (рис. 3). Пресс имеет два прямолинейных зажимных устройства, которые построены по типу пространственного механизма с замкнутой кинематической цепью. Позиционирование каждого зажимного устройства осуществляется за счет изменения длины четырех гидроцилиндров: двух горизонтальных и двух вертикальных. Обтяжной пресс FET симметричен справа налево, поэтому проведен анализ кинематики одного зажимного устройства [12, 13] (рис. 3б).



а) б)

Рисунок 3 – Внешний вид обтяжного пресса поперечного действия типа FET - (а) и кинематическая схема его зажимного устройства - (б)

Управление механизмов параллельной структуры невозможно без решения прямой и обратной задач кинематики зажимного устройства, которые решаются сложнее, чем для традиционных манипуляторов [14, 15]. Прямая задача кинематики определяет положение выходного звена (зажимного устройства) в пространстве при заданном положении обобщённых координат (длина гидроцилиндра или штанги), а обратная кинематическая задача определяет положение обобщённых координат при заданном положении зажимного устройства в пространстве.

Для позиционирования зажимного устройства пресса, с четырьмя активными гидроцилиндрами, решаются прямая и обратная задачи кинематики [16]. Решение обратной задачи заключается в определении длины активных управляющих гидроцилиндров пресса по координатам положения зажимного устройства, реализованное на основе матричного аппарата однородных преобразований.

При определении длин двух горизонтальных цилиндров учитывается наличие промежуточных пассивных звеньев. Решение прямой задачи, в которой определяется положение зажимного устройства по длинам управляющих гидроцилиндров, осуществляется итерационным методом Ньютона. При определении отклонения положения зажимного устройства используется обратная

матрица Якоби, элементы которой являются частными производными функции решения обратной задачи кинематики пресса.

На основе полученных кинематических зависимостей для определения положения рабочих органов обтяжного пресса FET и разработанных решений прямой и обратной задач кинематики разработана программа для ПЭВМ FET-NCTrans с реализованной математической моделью системы управления зажимами пресса (рис. 4). Разработанная программа позволяет, по заданной траектории движения зажимов пресса создавать УП, в которой могут быть заложены различные схемы деформирования заготовки методом обтяжки.

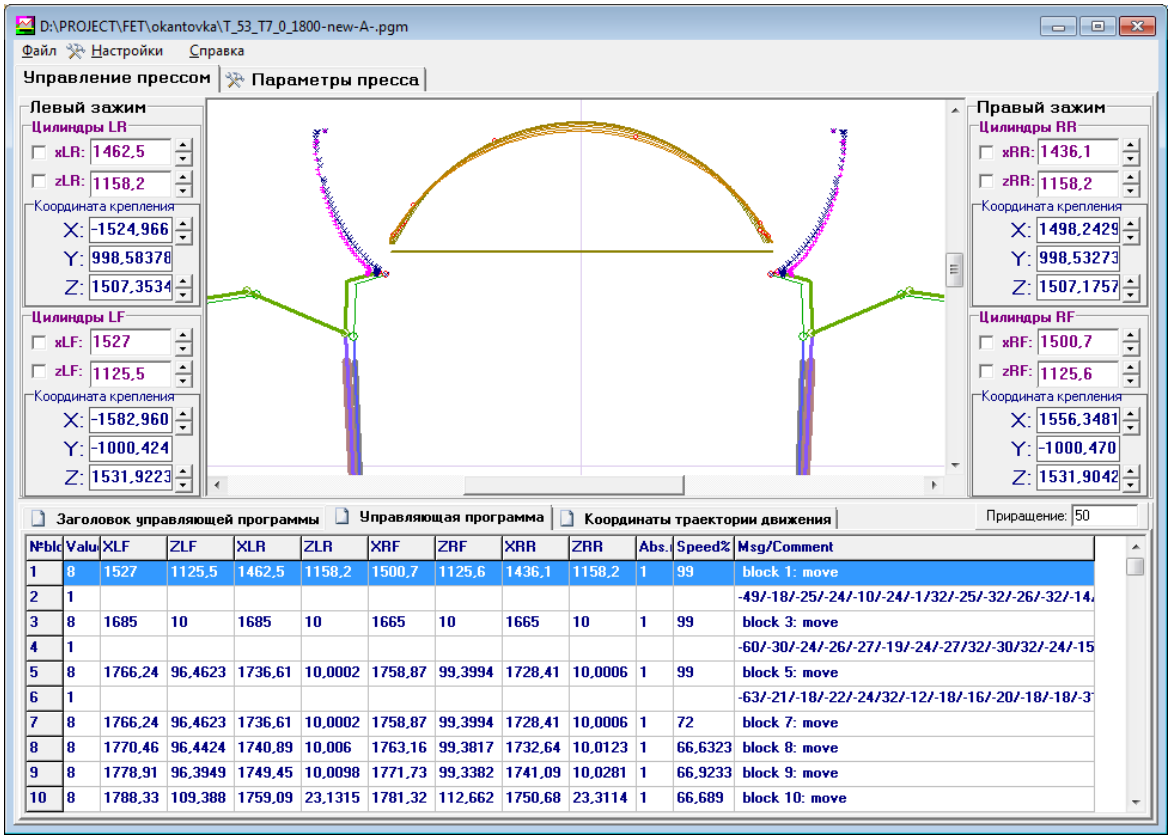


Рисунок 4 – Программа FET-NCTrans для обработки УП обтяжного пресса FET

2. Численное моделирование процесса формообразования листовой заготовки методом обтяжки

Рассматриваемая задача деформирования заготовки методом изгиба с растяжением имеет геометрическую и физическую нелинейность. Геометрическая нелинейность обусловлена изгибом заготовки при деформировании, большими перемещениями, а также смещением точек контакта между пуансоном и поверхностью заготовки при её калибровочном растяжении. Физическая нелинейность обусловлена нелинейными механическими свойствами материала заготовки. При постановке задачи и решении её методом конечных элементов (КЭ) необходимо учесть эти особенности [17].

Для проведения КЭ моделирования процесса формообразования деталей применялась CAE-система MSC.Marc которая широко используется для

моделирования технологических процессов, и позволяет решать широкий круг задач с учетом сложных пространственных контактных взаимодействий, больших пластических и упругих деформаций, и др. [18, 19].

При разработке численной модели процесса деформирования заготовки в препроцессоре MSC.Mentat, задается геометрия контактных тел (пуансон, зажим и заготовка), характер контактного взаимодействия тел, граничные условия, характеристики материала заготовки и управляющие процессом параметры (траектория перемещения зажимов предварительно рассчитанные в FET-NCTrans по заданной УП (рис. 6б)). Так как жесткость пуансона и зажимов пресса значительно выше, чем у заготовки из алюминиевого сплава, поэтому в модели их можно задать как недеформируемые тела, имеющие абсолютную жесткость.

При решении данной задачи использовался закон упрочнения, который задается мультилинейной функцией пластическая деформация – напряжение. Упругопластическая характеристика материала заготовки определена по результатам аппроксимации справочных данных соответствующего материала функцией линейно-степенного вида.

Структурный анализа выполняется со следующими настройками решателя:

– интегрирование ведется по времени с адаптивным шагом (Multi-Criteria);

– выбирается решатель для псевдо-статических задач механики (Structural);

– указывается опция решателя для больших деформаций в Лагранжевой постановке (Structural analysis options / Lange strain).

Результаты КЭ моделирования процесса формования заготовки при различных схемах нагружения приведены на рисунке 5. На рисунке 6а приведена геометрия заготовок после её нагружения и разгрузки.

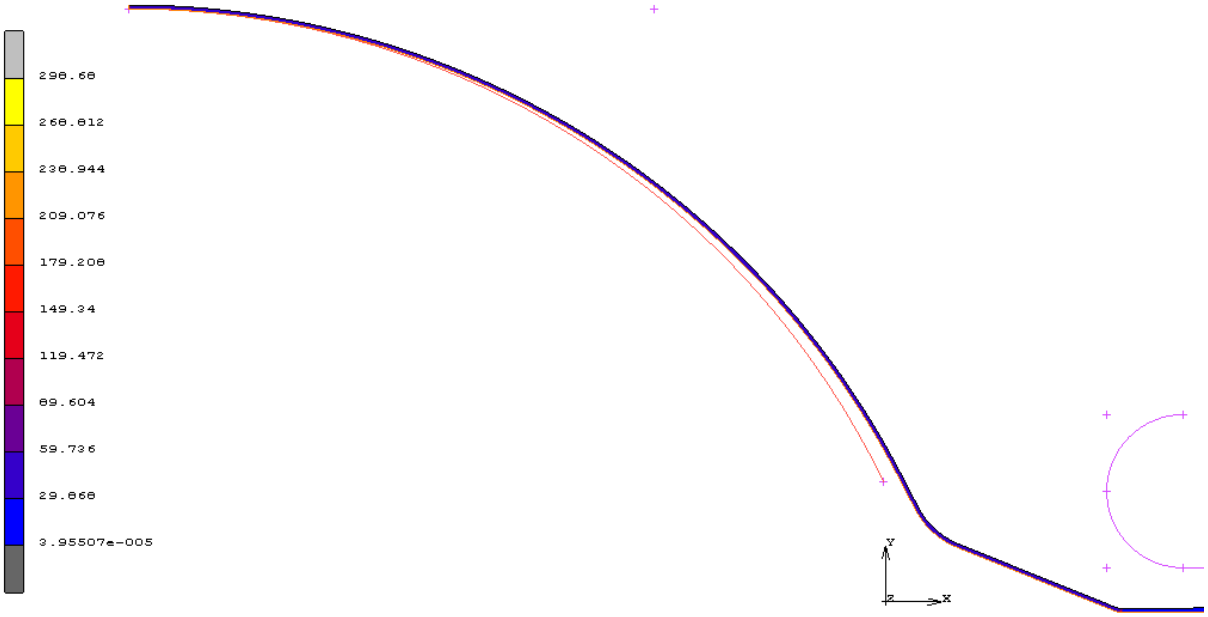
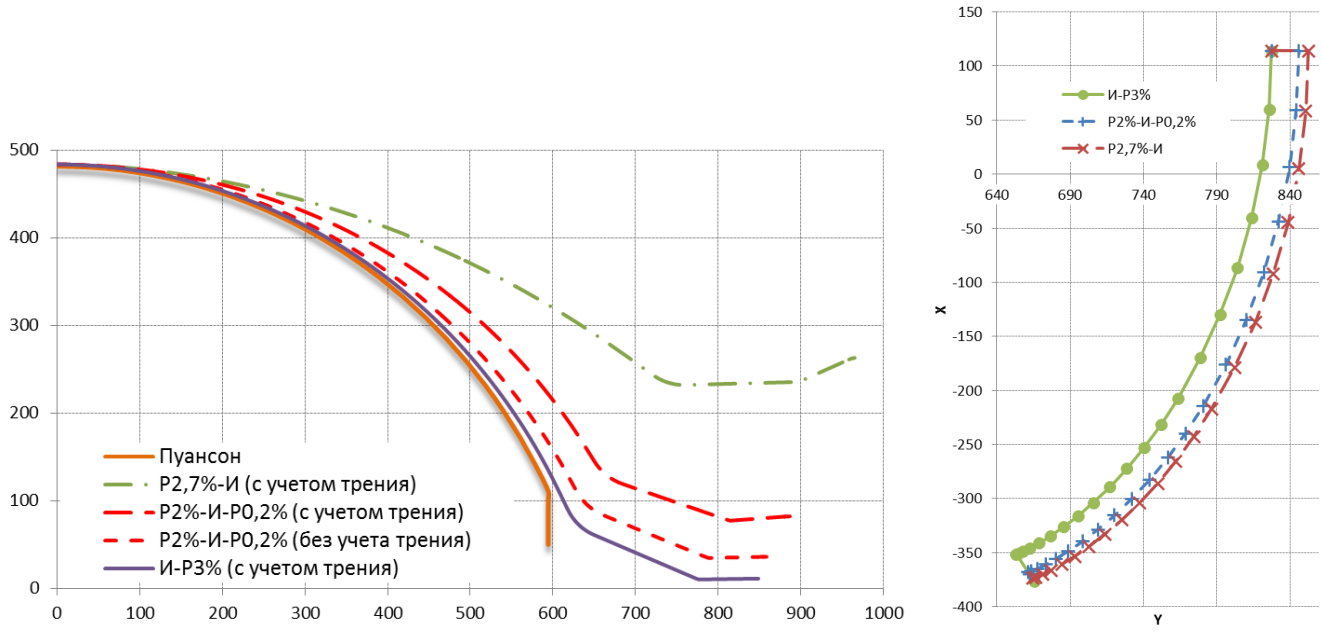


Рисунок 5 – Результат КЭ моделирования процесса формования заготовки по схеме Изгиб - Растяжение 3% (Эпюра эквивалентных напряжений (МПа))



а) б)

Рисунок 6 – Результат КЭ моделирования процесса формования заготовки при разных схемах нагружения – (а) и траектории движения зажима при разных схемах нагружения – (б)

3. Внедрение новых решений при разработке технологии изготовления окантовки двери самолета SSJ-NEW

В рамках разработки технологии изготовления окантовки задней двери самолета SSJ-NEW из сплава 1163 проведено моделирование процесса формообразования листовой заготовки в несколько этапов.

Геометрические характеристики детали: максимальная длина детали 3,6 м, ширина 1,44 м, толщина 2…8 мм, максимальный прогиб 0,9 м, угол оборачивания детали составляет 58°. На этапе первой итерации предлагается процесс формообразования свежезакаленной заготовки из сплава 1163 толщиной 10 мм производить за один переход на обтяжном прессе FET-1500.

В связи с большими габаритами детали и особенностью кинематики пресса необходимо определить оптимальное положение детали для её обтяжки. Большой угол оборачивания требует поднятия пуансона вверх при минимальных припусках, а загрузка заготовки в захватах требует уменьшение высоты пуансона и увеличения припусков (рис. 7). Для разрешения этих противоречий было рассмотрено 6 вариантов пуансонов, отличающихся различным положением детали относительно направления обтяжки. Из них выбраны 2 варианта, по которым CAM-система S3F рассчитала УП с наименьшим количеством замечаний (рис. 8):

1. Пуансон №1 устанавливается на высоту 2 м, габариты заготовки 4,8×1,75×0,01 м

2. Пуансон №2 устанавливается на высоту 1,85 м, габариты заготовки 4,8×2,0×0,01 м

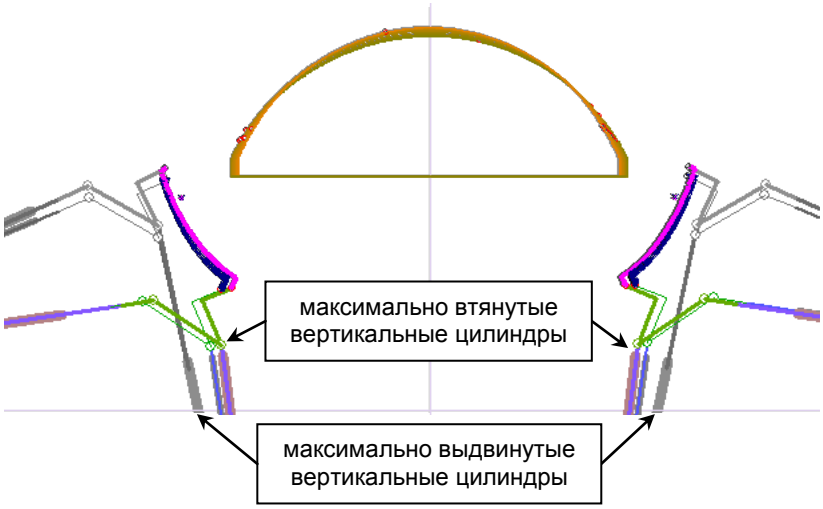
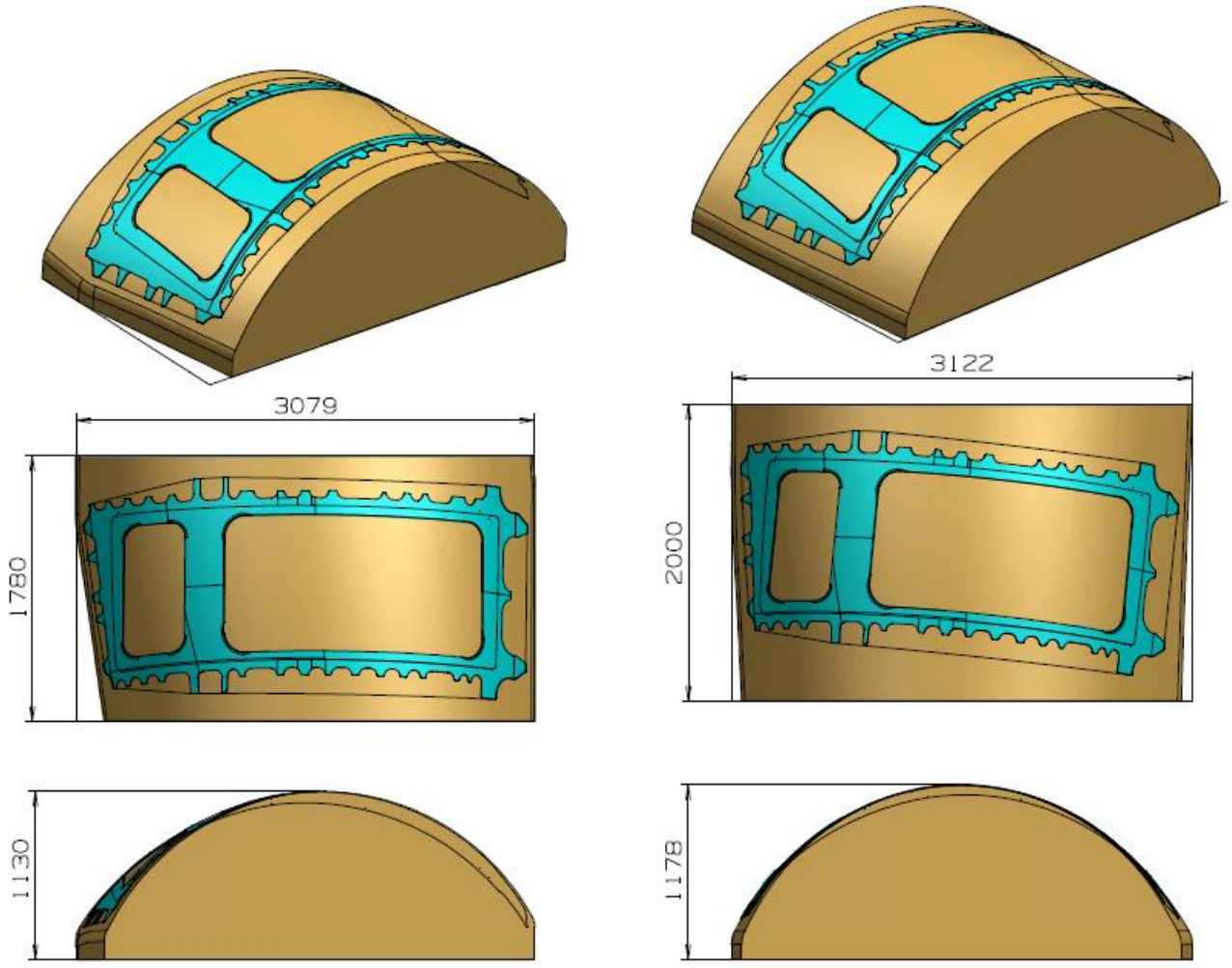


Рисунок 7 – Позиция захватов пресса, при положениях вертикальных цилиндров близких к предельным (траектория обтяжки по варианту 2)



Пуансон №1 Пуансон №2

Рисунок 8 – Варианты обтяжного пуансона

Результаты расчета УП для пресса FET-1500 приведены на рисунке 9. CAM-система S3F, рассчитав УП, указала на не оптимальность найденного решения для обоих вариантов пуансонов и выдала ряд предупреждений и рекомендаций:

– Рекомендуется увеличить длину и ширину заготовки;

– Рекомендуется увеличить высоту подставки или уменьшить величину припусков;

– Рекомендуется уменьшить высоту подставки или увеличить величину припусков или увеличить начальный угол оборачивания;

– Рекомендуется изменить параметры заготовки или изменить положение пуансона на столе пресса либо перепроектировать пуансон.

Из-за особенностей кинематики пресса и больших габаритов пуансона, удовлетворение всех рекомендаций системы S3F проблематично, поэтому вопрос поиска оптимальной стратегии обтяжки остается открытым.

При проектировании обтяжных пуансонов направление обтяжки, как правило, ориентируют по одной из осей, которые соответствуют нормалям плоскостей членения агрегатов самолета (вариант №1). Для крупногабаритных деталей, имеющих двойную кривизну с сильно выраженной конусностью или несимметричностью, на процесс обтяжки накладывается ряд требований и ограничений:

1. Затруднителен контроль движения зажимов пресса при их разнонаправленных наклонах.

2. Затруднительно определить оптимальное положение пуансона, удовлетворяющее ограничениям кинематики обтяжного пресса.

3. Несимметричное разнонаправленное движение зажимов может приводить к сползанию заготовки по пуансону в поперечном направлении обтяжки, что негативно скажется на точности изготовления детали.

4. В процессе обтяжки свежезакаленной заготовки оператор тратит много времени на контроль прилегания заготовки. Это увеличивает вероятность недоформовывания заготовки из-за снижения пластичности свежезакаленного материала с течением времени.

Для оптимизации процесса обтяжки необходимо минимизировать несимметричное разнонаправленное движения зажимов за счет выполнения следующих рекомендаций:

1. Изменить направление обтяжки относительно детали. При этом увеличатся габариты заготовки.

2. Базовую плоскость пуансона задать с таким условием, чтобы длины задней и передней кромок согнутой заготовки были одинаковыми.

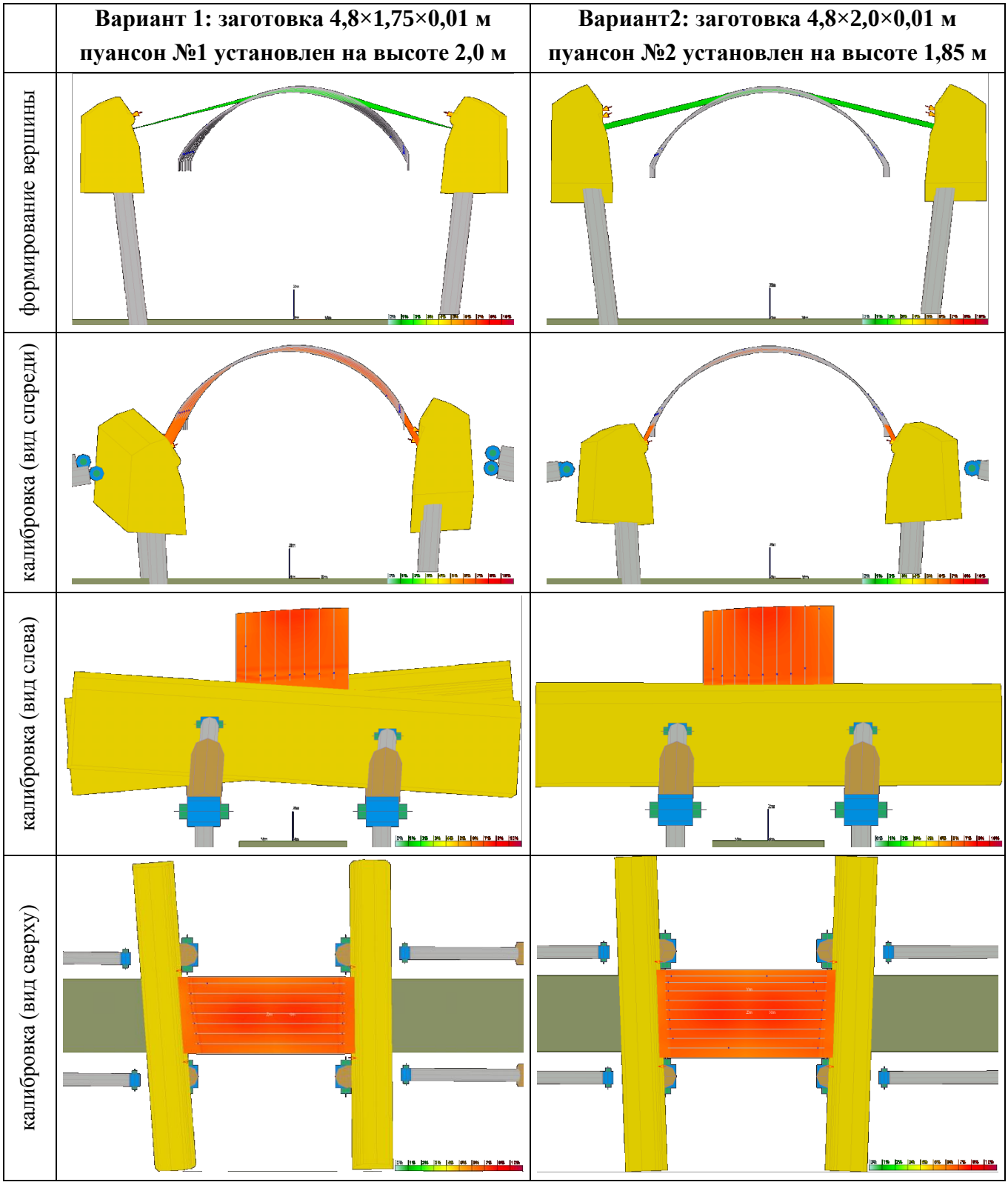


Рисунок 9 – Результат расчета в S3F процесса обтяжки заготовки

Для натурной отработки процесса изготовления окантовки задней двери был выработан вариант №2, как наиболее стабильный процесс (рис. 10). В системе S3F рассчитана УП для обтяжки за один переход на прессе FET-1500 свежезакаленной заготовки из сплава 1163 габаритами 4,5×1,9 м с установленным пуансоном на высоте 1,69 мм. В программе FET-NCTrans произведена корректировка УП в позиции зажатия заготовки, а также уменьшено количество шагов. В результате

натурной отработки были получены 2 заготовки соответствующие требуемым геометрическим параметрам (рис. 11).

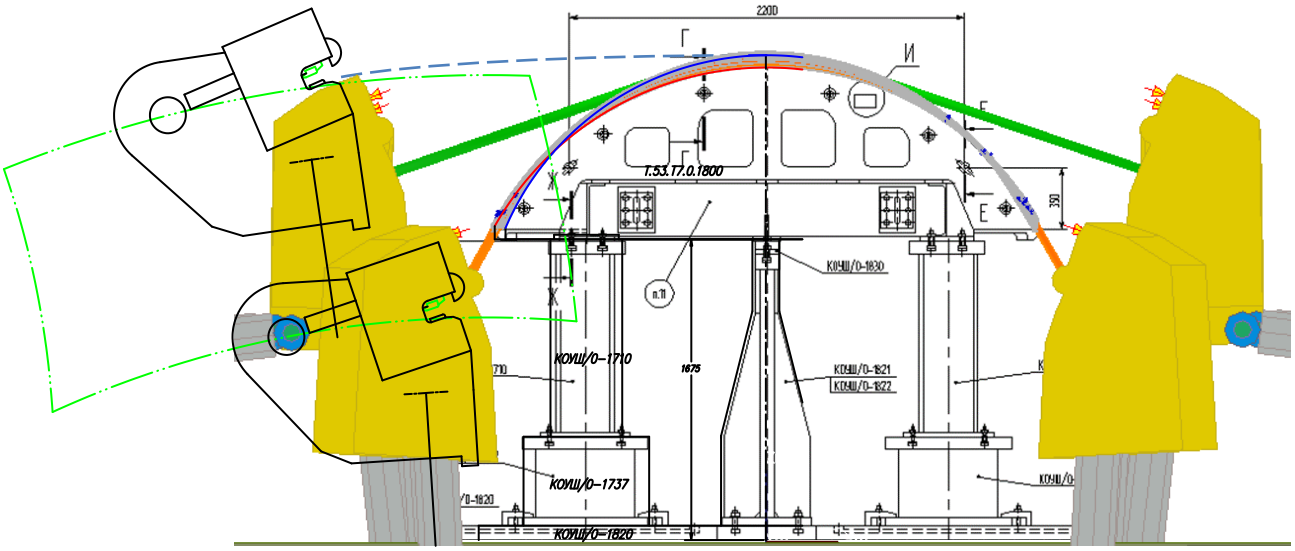


Рисунок 10 – Схема обтяжки крупногабаритной заготовки на пределе кинематических возможностей

Рисунок 11 – Результат отработки технологии обтяжки крупногабаритной заготовки

Заключение

В работе рассмотрены основные этапы разработки технологии формообразования заготовки на обтяжном оборудовании. Предложенная методика анализа и корректировки процесса формообразования крупногабаритных листовых заготовок на обтяжном оборудовании позволяет еще на ранней стадии технологической подготовки производства определить наиболее оптимальные технологические параметры.

Проведенный кинематический анализ обтяжного пресса FET позволил определить кинематические зависимости для управления положением его рабочих органов. На основании полученных зависимостей была разработана программа для ПЭВМ и внедрена в процесс разработки технологии обтяжки. Разработанная программа позволяет создавать УП по заданной траектории движения зажимов пресса, в которой могут быть заложены различные схемы деформирования заготовки методом обтяжки.

Применение современных средств численного моделирования позволяют получить более полную и точную информацию о напряженно-деформированном состоянии заготовки в процессе формообразования и после него.

Рассмотрены особенности и предложены рекомендации по проектированию обтяжных пуансонов для деталей, имеющих двойную кривизну с сильно выраженной несимметричностью.

Разработанные решения позволили в рамках вычислительного эксперимента отработать технологический процесс обтяжки с оптимальными технологическими параметрами, которые, при натурной отработке, позволили получить детали высокого качества. Это позволило исключить затраты при дополнительной отработке процесса обтяжки общепринятым методом, включающим в себя корректировку и отработку на прессе управляющих программ, изменение размеров заготовки и доработку обтяжного пуансона.

Список использованных источников

1. Автоматизация процессов подготовки авиационного производства на базе ЭВМ и оборудования с ЧПУ / В.А. Вайсбург, Б.А. Медведев, А.Н. Бакумский и др. - М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
2. Pogartseva, M.M. Technique for the development of the technological process for the tightening of aircraft parts on CNC presses / M.M. Pogartseva, S.I. Feoktistov // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 839-844.
3. Крупский, Р.Ф. Моделирование кинетики движения рабочих элементов обтяжного пресса FET / Р.Ф. Крупский, А.А. Кривенок, А.В. Станкевич, С.В. Белых, В.А. Мироненко // Вестник ИрГТУ. Механика и машиностроение. – 2014. – № 9 (92). – С. 40-45.
4. Михеев, В.А. Кинематический метод обеспечения подготовки управляющих программ ЧПУ обтяжных прессов фирмы ACB-ALSTHOM / Михеев В.А., Сурудин С.В., Науменко И.В., Назайкинский Е.В. // – С. 35-49.
5. Вепрев, А.А. Выбор схемы нагружения и скорости ведения процесса поперечной обтяжки / А.А. Вепрев, В.И. Завьялова // Авиационная промышленность. – 1984. – №12.
6. Кривенок, А.А. Формообразование профильных заготовок с помощью листового обтяжного пресса / А.А. Кривенок, А.В. Станкевич, С.И. Феоктистов, Р.Ф. Крупский, С.В. Белых // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. –2013. – № II–1(14) – С. 4–8.
7. Михеев, В.А. Особенности расчета процессов обтяжки деталей сложной формы / В.А. Михеев, Е.В. Чистяков. – Куйбышев, 1981. – № 1209 – С. 10.
8. Сурудин, С.В. Сочетание конечно-элементного моделирования и расчета по аналитическим формулам процессов формообразования обтяжкой / С.В. Сурудин //

НАЦИОНАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ УЧЕННЫХ (НАУ), Ежемесячный научный журнал. – 2015. – № 3 (8) ЧАСТЬ 3 – С. 139–141.
9. Белых, С.В. Определение положения пуансона в рабочем пространстве обтяжного пресса FET в процессе технологической подготовки производства / С.В. Белых, А.А. Кривенок, В.В. Мироненко, В.А. Мишагин // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2013. – №12(83) – С. 36–41.
10. Михеев, В.А. Моделирование кинематической схемы последовательной обтяжки оболочек двояковыпуклой формы на обтяжном прессе FEKD / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, С.Г. Дементьев, В.П. Самохвалов, Д.В. Савин, С.В. Сурудин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16. №6. – С. 172–179.
11. Михеев, В.А. Исследование кинематической схемы последовательной обтяжки оболочек двояковыпуклой формы на обтяжном прессе FEKD / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, С.Г. Дементьев, В.П. Самохвалов, Д.В. Савин, С.В. Сурудин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16. №6. – С. 180–186.
12. Глазунов, В.А. Пространственные механизмы параллельной структуры: учебное пособие / В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Ф. Крайнев. – М.: Наука, 1991. 94 с.
13. Merlet J.-P. Parallel Robots / J.-P. Merlet. - 2nd ed., Springer Dordrecht, The Netherlands, 2006.
14. Глазунов, В.А. Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрестной структуры / Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. // Проблемы машиностроения и надежности машин. Вып. 2. М.: Наука, 2008. С. 100-110.
15. Янг, Д., Исследование кинематики манипуляторов платформенного типа / Янг Д., Ли Т. // Конструирование. 1984. Т. 106, № 2. С. 264-272. [Yang D.C., Lee T.W. Feasibility Study of a Platform Type of Robotic Manipulators from a Kinematic Viewpoint // Transactions of ASME Journal of Mechanisms, Transmission and Automation in Design. 1984. Vol. 106. P. 191-198.
16. A.A. Krivenok, A.A. Burenin On the Parallel Kinematics of the FET Stretching Press in the Stretch Forming Operations in the Manufacture of Parts with Complex Spatial Geometry // J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys., 2021, 14(6), 1–11. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-1-11.
17. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: / Р. Галлагер; Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.,
18. Marc® 2007 r1. Marc. Training Guide.
19. Marc® 2007 r1. MSC.Marc. Mentat. Help Reference.