

Внедрение в производство деталей изделия МС-21 технологии формообразования крупногабаритных обшивок двойной кривизны в условиях ограничений прессового оборудования

Кривенок А.А., Ведущий инженер УТР-НПИЦ, к.т.н.
Крупский Р.Ф., Главный научный сотрудник, к.т.н.
Кузнецов А.К., Инженер-технолог 1 категории ОГТ-ОШЗР
Толчеев Л.В., Начальник ОГТ-ОШЗР
Филиал ПАО «ОАК» - «КнААЗ им. Ю.А.Гагарина»
681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1

В рамках освоения серийного производства обшивок отсека Ф1 самолета МС-21 на КнААЗ им. Ю.А. Гагарина проведена работа по повышению технологичности изготовления деталей на обтяжных прессах FET-1500 и FEL 2×500. Для повышения технологичности изготовления оболочек двойной кривизны разработана методика, позволяющая, на основе кинематической модели прессового оборудования, производить численное моделирование процесса формообразования листовых заготовок.

При разработке технологии изготовления обшивок самолета МС-21 новые подходы к моделированию процесса формообразования позволили выбрать наиболее оптимальные стратегии обтяжки крупногабаритных листовых заготовок на прессе продольной обтяжки FEL 2×500. Разработанные решения позволили в рамках вычислительного эксперимента отработать технологический процесс обтяжки с оптимальными технологическими параметрами, которые, при натурной отработке, позволили получить детали высокого качества при минимальных затратах на натурную отработку процесса изготовления обшивок самолета МС-21.

Ключевые слова: формообразование обтяжкой, пресс обтяжной, FEL, кинематический анализ, обтяжной пуансон, самолет МС-21.

1. Передача объема обшивок и панелей

В 2022 году с ПАО «Ил»-Авиастар на КнААЗ был передан объем по изготовлению панелей и обшивок отсека Ф1 самолета МС-21. В связи с отличием обтяжного оборудования пуансоны «Ил»-Авиастар плохо подходят для прессов КнААЗ. Для использования существующих пуансонов на обтяжных прессах FET и FEL необходимо производить их установку под наиболее оптимальными углами с применением различных подставок.

Для устранения данных проблем необходимо изготовление новых пуансонов с перерасчетом УП, сопровождение технологии обтяжки обшивок, в том числе в части создания УП для обтяжных прессов. Одной из наиболее сложных обшивок является обшивка боковая нижняя, на примере которой продемонстрированы разработанные решения по внедрению технологии формообразования крупногабаритных обшивок двойной кривизны в условиях ограничений прессового оборудования.

2. Анализ геометрии обшивки и определение прессового оборудования для её изготовления

В процессе освоения технологии изготовления нижних боковых обшивок отсека Ф1 самолета МС-21 (рис. 1) производство столкнулось с рядом проблем, связанных с геометрическими особенностями обшивок и ограничениями существующего прессового оборудования. Обшивка имеет большую кривизну, асимметрию, большие углы схода, трапециевидную конусообразную форму и кручение относительно продольной оси. Изготовление данной обшивки наиболее оптимально подходит для технологии поперечной обтяжки [1].

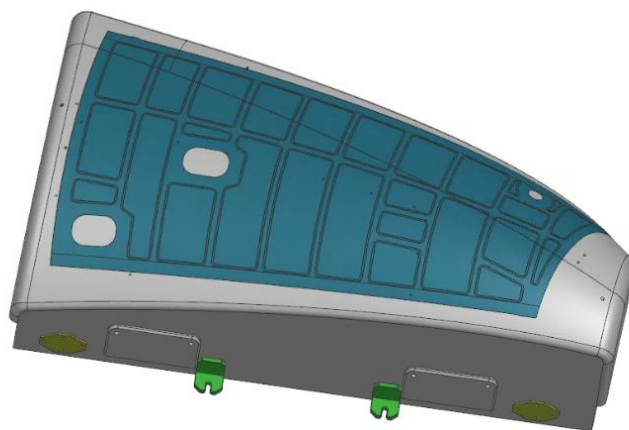


Рисунок 1 - Обшивка на пуансоне трапециевидной конусообразной формы

Моделирование процесса формообразования листовой заготовки на прессе поперечной обтяжки FET-1500 показало хороший результат по прилеганию к пуансону, без образования гофр и обрывов заготовки (рис. 2). Однако, для реализации данного процесса потребуется заготовка шириной больше 2200 мм, что превышает возможности отечественных металлургических предприятий выпускающих листовый прокат. В связи с ограничением ширины листовой заготовки данную обшивку приходится изготавливать путем формообразования заготовки методом продольной обтяжки [2].

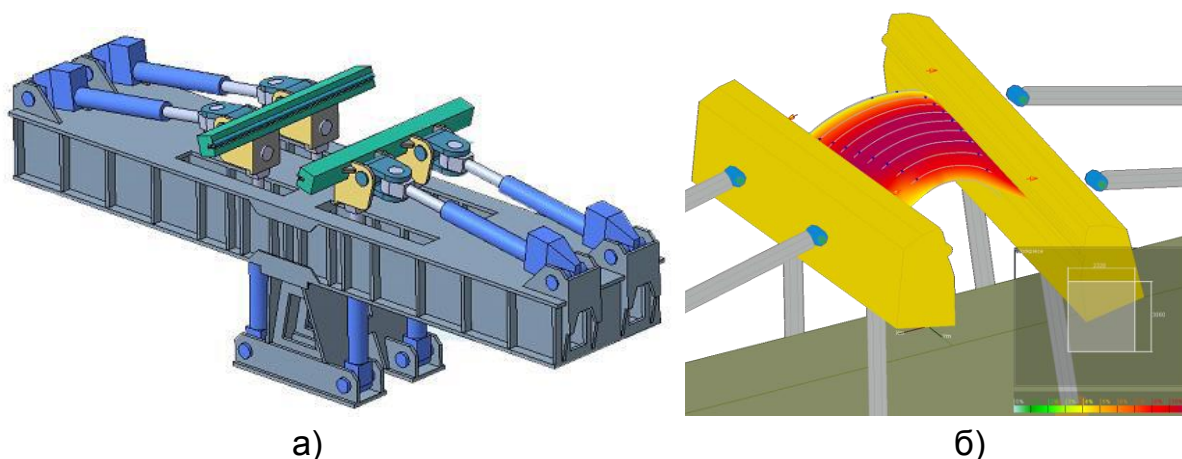


Рисунок 2 - Пресс поперечной обтяжки FET-1500 (а) и результат моделирования в системе S3F процесса обтяжки листовой заготовки (б)

Для реализации технологии продольной обтяжки хорошо подходят прессы с подъемным столом, такой, например, как РО-630 (рис. 3). Кинематика прессы РО-630 позволяет поднимать пуансон с углами наклона стола и наклона зажимов заготовки, что обеспечивает минимальные перегибы листовой заготовки в зажимах, и, как следствие, минимальный риск обрыва заготовки. Однако, в связи с трапецевидной конусной формой обшивки и малым радиусом кривизны 660 мм, минимизировать перегиб в зажимах не удастся, что приводит к постоянным обрывам заготовки.

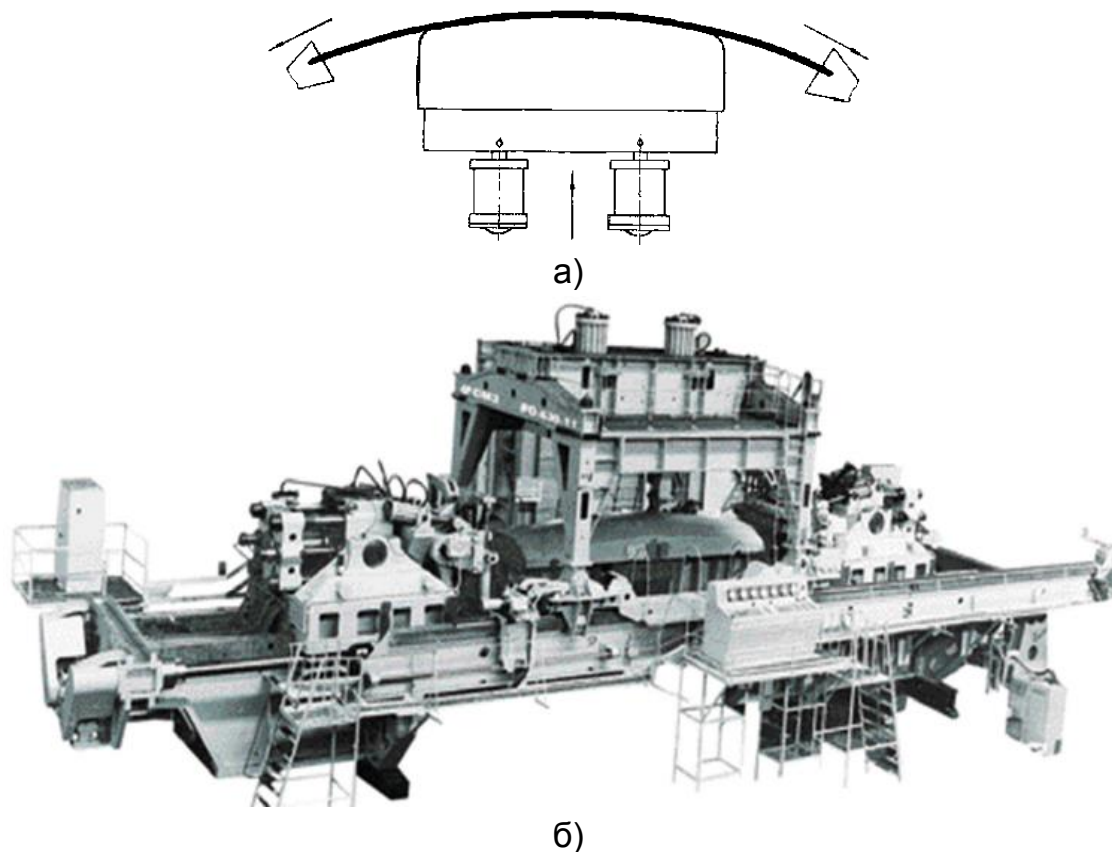


Рисунок 3 - Формообразование заготовки растяжением с подъемом пуансона (а), пресс продольной обтяжки РО-630 (б)

Снизить вероятность обрыва заготовки в процессе обтяжки возможно за счет использования прессового оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), которое позволяет добиться высокой гибкости управления процессом и стабильного его повторения. Так нашел широкое применение пресс продольной фирмы АСВ FEL с ЧПУ (рис. 4). Этот пресс имеет неподвижный стол и два искривляющихся зажима с вращением по трем осям. При разработке технологии продольной обтяжки заготовок на прессе FEL и расчете для него управляющих программ (УП) требуется учитывать геометрические особенности изготавливаемой обшивки с привязкой к кинематическим возможностям прессы.

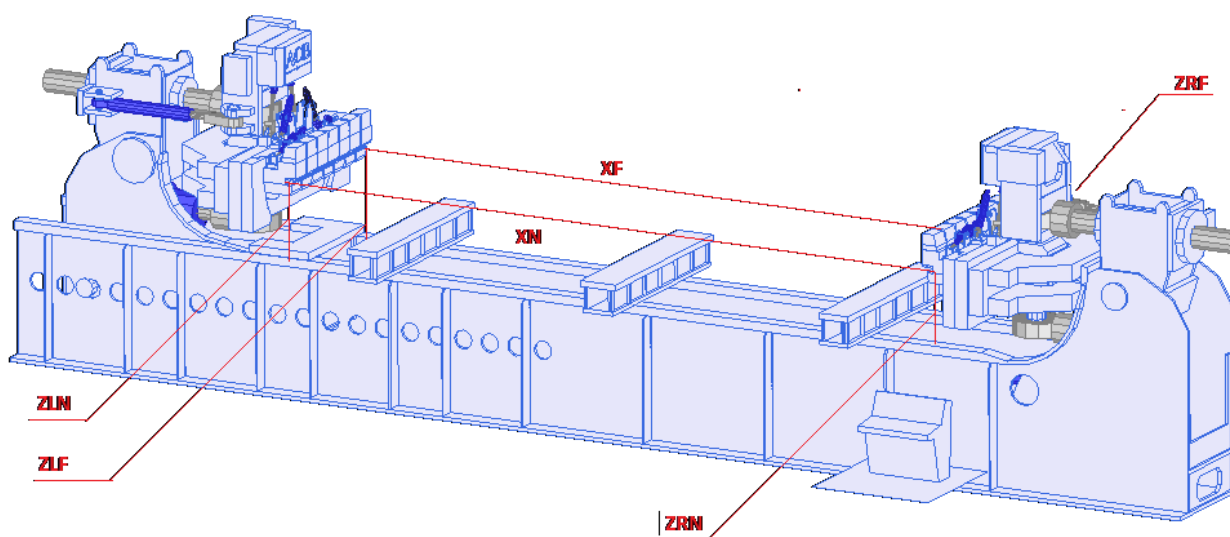


Рисунок 4 - Пресс продольной обтяжки FEL

3. Цели и задачи

Целью работы является снижение материальных и временных затрат на разработку технологии изготовления обшивок двойной кривизны с использованием процесса продольной обтяжки листовых заготовок за счет применения инструментов математического моделирования, обеспечивающих разработку управляющих программ для процесса автоматизированного формообразования на обтяжных прессах с ЧПУ.

В процесс разработки управляющих программ необходимо включить инструменты математического моделирования, которые позволят технологу получать полный объем информации на ранних этапах разработки технологии формообразования (рис. 5). Для реализации предложенного подхода необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести кинематический анализ обтяжного пресса FEL и разработать кинематическую модель (КМ), позволяющую производить расчет УП для этого типа оборудования;
2. Разработать математическую модель процесса формообразования листовой заготовки методом продольной обтяжки;
3. Произвести апробацию предложенных решений и внедрить их в процесс разработки технологии изготовления листовых обшивок.

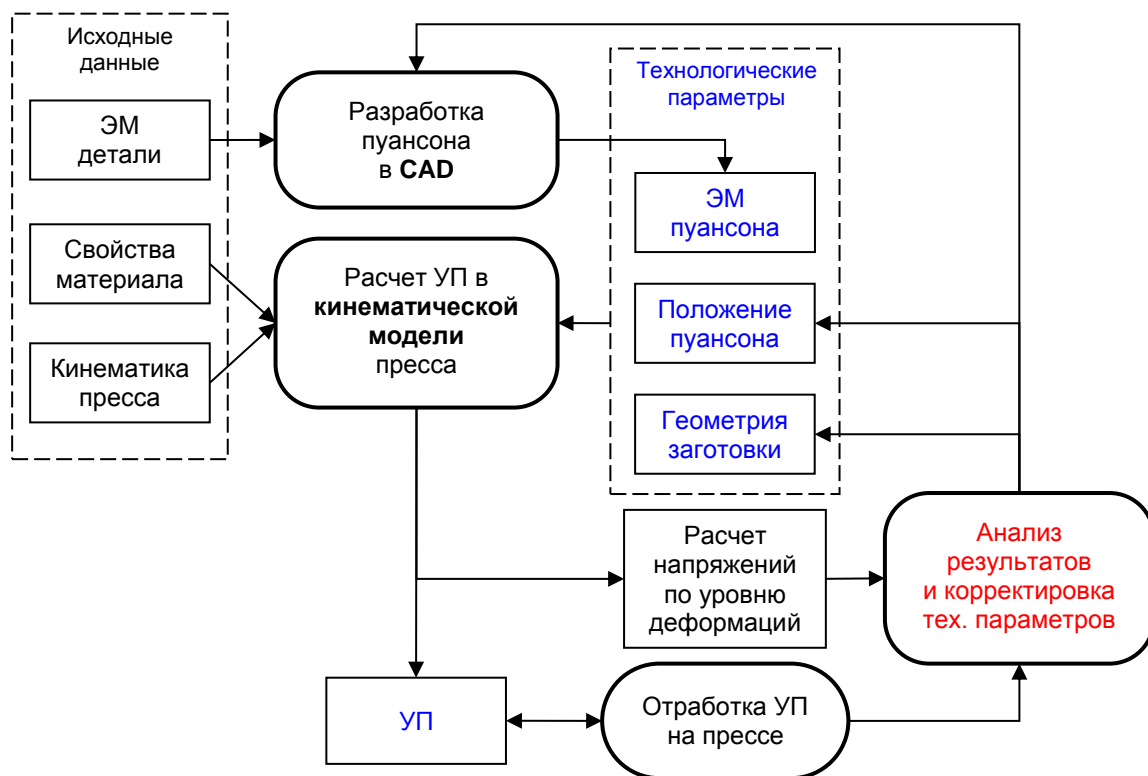


Рисунок 5 – Схема процесса разработки УП на основе кинематической модели пресса

4. 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 по пуансону. 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 [3-8]:

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

На начальном этапе разработки технологии, технологу необходимо провести анализ геометрии детали, разработать технологический процесс, с учетом специфических особенностей процесса обтяжки, проработать геометрию пуансона, на основании которого разработать управляющую программу. Для разработки управляющих программ (УП) для ЧПУ обтяжного оборудования фирмы ACB существует САМ-системы S3F, в которой

выполняется моделирование процесса формообразования заготовки и транслируется траектории движения рабочих органов пресса в управляющий код для соответствующей модели пресса.

На траекторию движения рабочих органов пресса значительное влияние оказывают такие параметры как размеры заготовки и размещение пуансона на столе пресса. При проработке крупногабаритных обшивок сложной пространственной формы, когда движение концов заготовки ограничено габаритами пресса, неправильно выбранные параметры размещения пуансона и размеров заготовки могут привести к тому, что для движения концов заготовки не хватит кинематических возможностей пресса. Также существует опасность контакта зажимов пресса с технологической подставкой под пуансон, что не учитывается при расчете УП в системе S3F. При выявлении коллизии зажима и оснастки, потребуется дополнительный пересчет УП с новыми параметрами размера заготовки или положения пуансона на столе пресса. 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, особенности его кинематики.

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 САМ-систему S3F, требует длительного много-итерационного поиска по различным технологическим параметрам, включающего отработку на прессе и доработку технологической оснастки.

5. Кинематический анализ пресса продольной обтяжки FEL, анализ геометрии обшивки

При анализе геометрии обшивки боковой нижней самолета MC-21 и пуансона, кинематики пресса FEL 2×500 было установлено:

1. Минимальный поперечный радиус обшивки составляет 660 мм, что меньше минимального радиуса искривления зажима пресса FEL- 730 мм (рис. 6). Кинематические ограничения пресса, не позволяющие обеспечить требуемое искривление зажима, приводят к тому, что при оборачивании листовой заготовки происходит её перегиб в губках зажима (рис. 7), что приводит к обрыву заготовки.

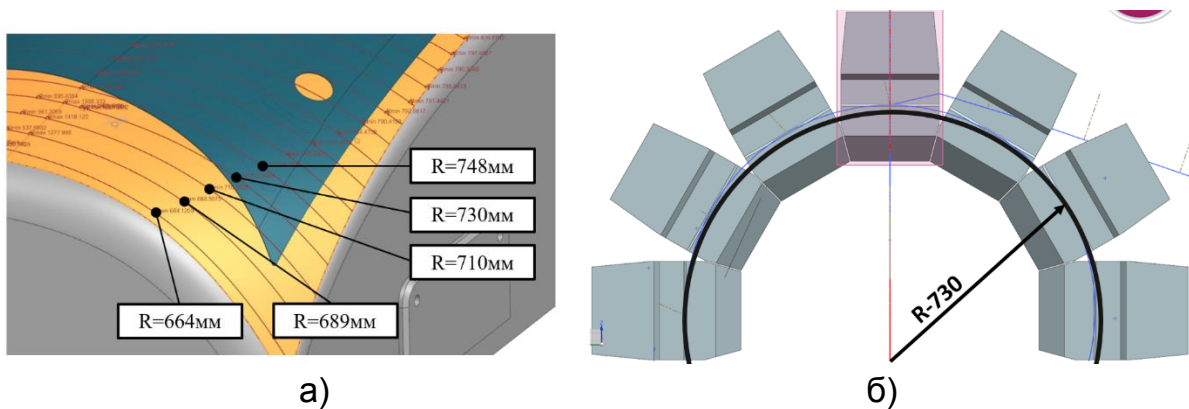


Рисунок 6 - Радиус изгиба в носовой части обшивки (а), минимальный радиус искривления губок пресса (б)

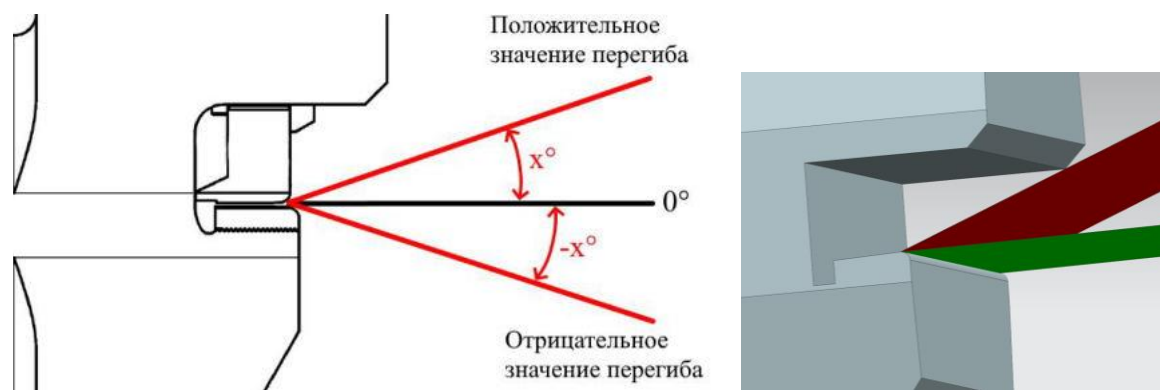


Рисунок 7 - Перегиб заготовки в губках пресса

В технологическом процессе обтяжки в длину заготовки включено расстояние припуска, компенсирующее снижение длины листа при возможных обрывах. Конусообразная форма обшивки, при увеличении длины припуска заготовки, потребует уменьшение радиуса искривления зажима, что приведет к увеличению перегиба в губках пресса и, как следствие, к увеличению вероятности обрыва листовой заготовки. Поэтому в данном случае высокая вероятность обрыва листа по линии зажатия в губках пресса невозможно компенсировать увеличением длины припуска заготовки. Наоборот, для минимизации вероятности обрыва листа необходимо использовать минимально возможную длину припуска заготовки, не оставляя длины на возможный обрыв листа.

Перегиб листовой заготовки в губках зажима пресса возможно снизить за счет снижения искривления зажима, что приведет к недооборачиванию заготовки. При минимизации перегиба заготовки в губках зажима невозможно обеспечить требуемое прилегание листа заготовки к пуансону в зоне обшивки. При обеспечении полного прилегания листа к пуансону образующиеся углы перегиба приводят к обрывам листа до тех пор, пока процесс обтяжки становится невозможным. При таких особенностях геометрии обшивки и кинематике пресса необходимо находить баланс между степенью прилегания листа заготовки к пуансону и фактическому количеству обрывов листа заготовки.

2. Гребень деформации представляет собой участок поверхности обшивки с наибольшей кривизной (рис. 8). Направление формообразующего продольного гребня на поверхности обтяжного пуансона не совпадает с направлением растяжения при обтяжке листовой заготовки, что приводит к сдвиговым деформациям с образованием складок и гофр. Для минимизации гофрообразования и повышения прилегания листа к пуансону необходимо такое позиционирование детали относительно пресса, при котором угол между направлением обтяжки и гребнем деформации будет минимальным. При расположении имеющегося пуансона по центру стола пресса гребень деформации находится под углом к направлению обтяжки. При уменьшении угла между гребнем и продольной осью пресса повышается угол перегиба листа в губках, что увеличивает вероятность обрыва листа. При балансировке пуансона на обшивку конусообразной формы необходимо минимизировать угол «гребень - продольная ось» и угол перегиба листа заготовки в губках пресса.

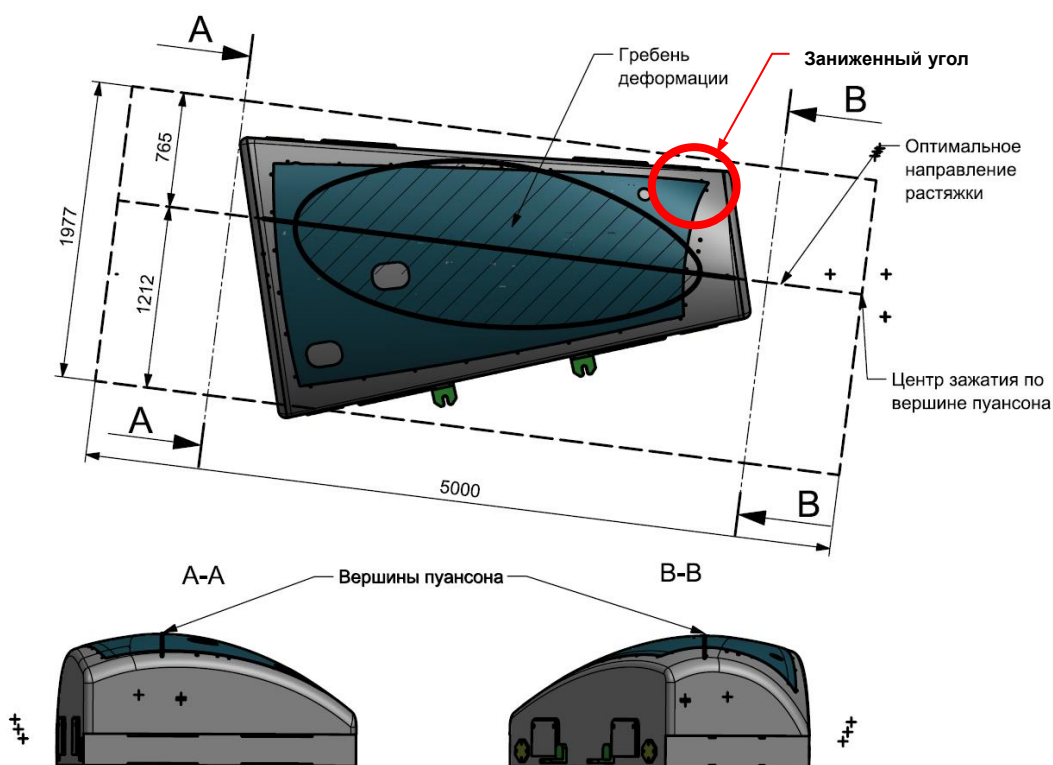


Рисунок 8 - Гребень деформации

3. Геометрия обшивки имеет кручение относительно продольной оси. Кинематика пресса FEL позволяет производить обтяжку с противоположными углами поворота зажимов относительно продольной оси пресса $\pm 15^\circ$. Нагрузка на заготовку при таком нагружении вызывает гофрообразование. Для минимизации гофр применяется контрформование. На прессе FEL контрформование выполнено в виде ремней, наложенных сверху листовой заготовки, осуществляющих натяжку гидроцилиндрами (рис. 9). При балансировке пуансона необходимо предусматривать контрформование ремнями в местах напряжений, вызывающих гофрообразование, что не соответствует положению с оптимальным отношением прилегания листа к

углам перегиба заготовки в губках. Необходим поиск положения детали относительно прессы с учетом использования контрформования, требуемого прилегания листа к пуансону и минимально возможного угла перегиба в губках прессы.



Рисунок 9 - Ремни для контрформования на прессе FEL 2×500

4. Прилегание листа заготовки в углу обшивки (рис. 8) загнутого вниз невозможно обеспечить заданием большего искривления губок или их поворота относительно продольной оси прессы из-за высокой вероятности обрыва листа и ограничений кинематики прессы. Прилегание в данном случае можно добиться поворотом пуансона относительно продольной оси прессы. Поворот также увеличит угол перегиба в губках, поэтому необходимо установить пуансон с поворотом относительно продольной оси между углом, обеспечивающим прилегание в необходимом месте и углом, при котором происходит разрушение листа.

5. Конусная форма имеющегося пуансона и образующиеся в таком случае продольные перегибы листа по краю болванки делают невозможным применение контрформования в месте «угла». Конструкция нового пуансона должна обеспечивать возможность применения ремней в районе «угла».

6. При имеющихся углах схода заготовки с пуансона для изготовления обшивки необходимо поднять пуансон на 600 мм относительно стола прессы.

6. Внедрение новых решений при разработке технологии изготовления обшивок самолета МС-21

В связи с тем, что существующие методы расчета УП, заложенные в САМ-системе S3F, не позволяют провести моделирование процесса формообразования столь сложной детали, была разработана параметризованная кинематическая модель прессы FEL 2×500 (рис. 10), позволяющая по положению зажимов определять управляющие параметры прессы. Для определения положения и конфигурации зажимов в кинематическую модель подгружается модель пуансона с

параметризованными поверхностями схождения с пуансона листовой заготовки. По разработанной математической модели «пресс-пуансон» возможно в первом приближении рассчитать балансировку пуансона, прилегание листа по нему, угол перегиба листа по линии зажатия в губках пресса, возможные столкновения оснастки и пресса, линейные деформации листа в направлении обтяжки.

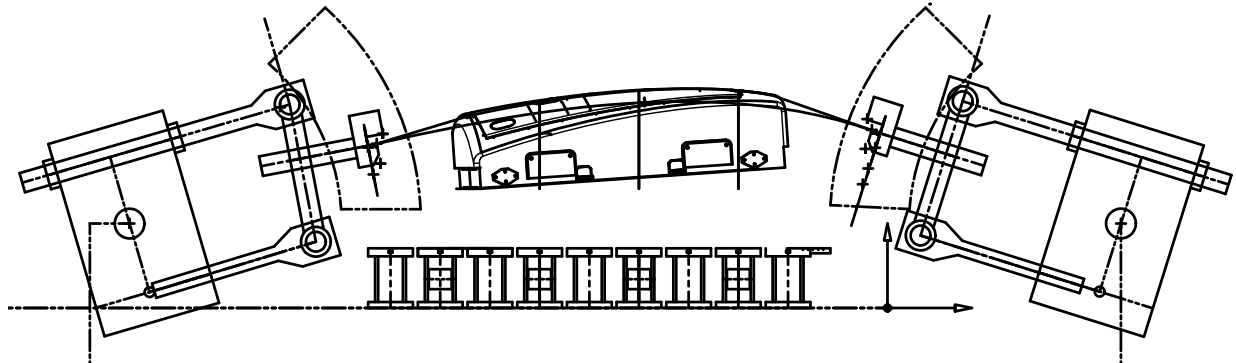


Рисунок 10 – Кинематическая модель пресса FEL с обтяжным пуансоном

Входными параметрами математической модели являются геометрия пуансона и уровни деформации листовой заготовки на каждом шаге процесса формообразования. По заданным уровням деформации происходит пересчет положения параметризованных припусков заготовки, по которым пересчитывается положение зажимов пресса. Из рассчитанного состояния кинематической модели выгружаются управляющие параметры, по которым производится генерация УП для пресса (рис. 11). Расчет УП производился покадрово с контролем углов перегиба по губкам пресса и максимально допустимых значений деформаций листа за переход.

Имя		Формула	Значение	Единица	Тип
Группа по у...					
Car	5		5	мм	Число
FC1 (SK...	30		30	граду...	Число
FC2 (SK...	30		30	граду...	Число
FC3 (SK...	2		2	граду...	Число
FC4 (SK...	22.5		22.5	граду...	Число
FC5 (SK...	0		0	граду...	Число
FC6 (SK...	0		0	граду...	Число
FDS (SK...	-2.05		-2.05	граду...	Число
FOS (SK...	0		0	граду...	Число
FRT (SK...	13		13	граду...	Число
FST (SK...	274.5		274.5	мм	Число
FSW (SK...	16.9		16.9	граду...	Число
MC1 (S...	9.36148		9.36148	граду...	Число
MC2 (S...	9.379150000000...		9.37915	граду...	Число
MC3 (S...	10.70742		10.70742	граду...	Число
MC4 (S...	11.4153		11.4153	граду...	Число
MC5 (S...	0		0	граду...	Число
MC6 (S...	0		0	граду...	Число
MCar (S...	5245+81+Car*4...		7626	мм	Число
MDS (S...	5.5		5.5	граду...	Число
MOS (S...	0.1		0.1	граду...	Число
MRT (S...	-10		-10	граду...	Число
MST (S...	260.25		260.25	мм	Число
MSW (S...	16.3		16.3	граду...	Число

Подвижная		Неподвижная				Каретка	
№	Параметр	1	2	3	4	5	6
MC1	9.36	30.00	FC1	20.00	20.00	30.00	30.00
MC2	9.38	30.00	FC2	20.00	20.00	30.00	30.00
MC3	10.71	2.00	FC3	1.83	1.83	2.00	2.00
MC4	11.42	20.00	FC4	15.00	15.00	20.00	20.00
MC5	0.00	0.00	FC5	0.00	0.00	0.00	0.00
MC6	0.00	0.00	FC6	0.00	0.00	0.00	0.00
MRT	-10.00	FRT	10.00	10.00	12.00	14.00	

№ кадр	Параметр	Значение	Единица	Примечание
1	MST	274.5	мм	
2	MDS	5.5	граду...	
3	MOS	0.1	граду...	
4	MSW	16.3	граду...	
5	FST	274.5	мм	
6	FDS	5.5	граду...	
7	FOS	0	граду...	
8	FRT	13	граду...	
9	FRT	10	граду...	
10	FRT	10	граду...	
11	FRT	10	граду...	
12	FRT	10	граду...	
13	FRT	10	граду...	
14	FRT	10	граду...	
15	FRT	10	граду...	
16	FRT	10	граду...	
17	FRT	10	граду...	
18	FRT	10	граду...	

Рисунок 11 – Управляющие параметры пресса FEL при подготовке управляющей программы

Для отработки технологии изготовления данной обшивки производилась балансировка имеющегося пуансона методом последовательных приближений в математической модели, после чего было отработано данное положение пуансона на 8 серийных обшивках. По оптимизированному положению пуансона разработан и запущен в производство новый пуансон, исключая длительный процесс установки пуансона в требуемое положение (рис. 12).

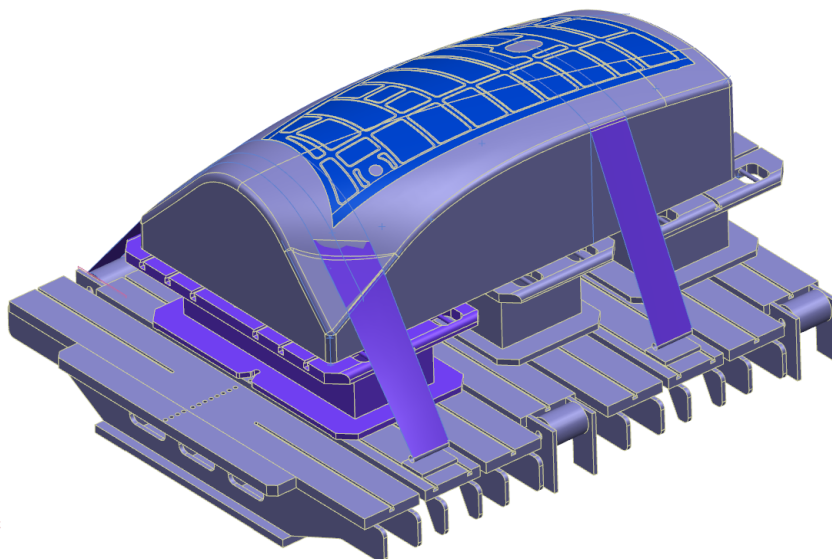
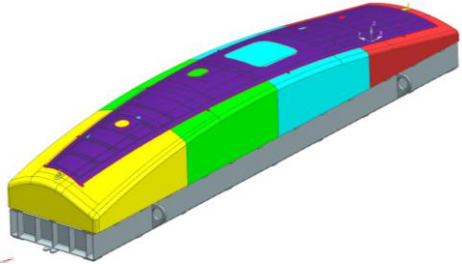
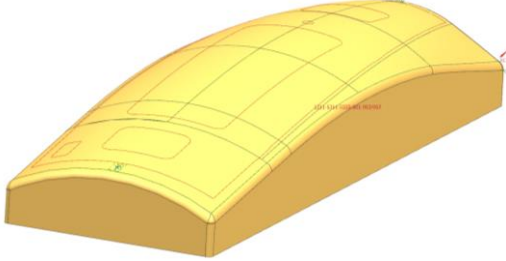
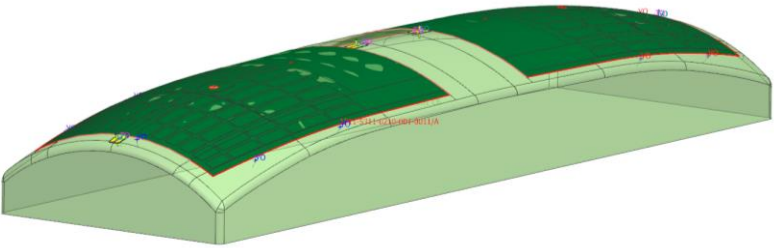

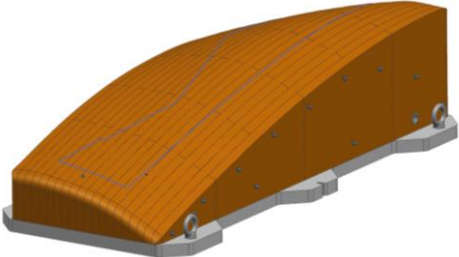
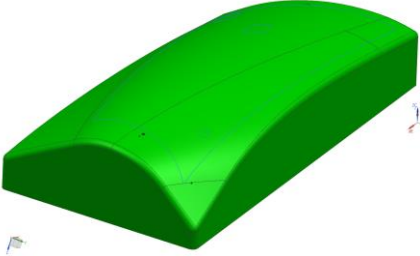
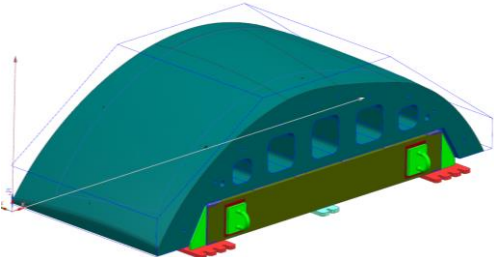


Рисунок 12 - Модель нового пуансона с подставками

В результате проделанной работы получена модель обтяжного пуансона с необходимой балансировкой и рассчитана УП, что решает проблемы по прилеганию листа, возможности его обрыва, устраняет продольные переломы листа по пуансону, исключает трудоемкое позиционирование и фиксацию пуансона и подставок, обеспечивает единообразие выпускаемой продукции.

Аналогичная работа по анализу геометрии обшивок, проектированию пуансонов с необходимой балансировкой, расчету УП, изготовлению пуансонов и отработке УП проведена с остальными обшивками и панелями отсека Ф1 самолета МС-21, требующим перебалансировки пуансонов. (таблица. 1).

Таблица 1 - Модели пуансонов на обшивки отсека Ф1 изделия МС-21

№	Шифр обшивок	Модели пуансонов
1	1211-5311-0340-017-0031	
2	1211-5311-0330-040-0031 (зеркальные)	
3	1211-5311-0320-001-0031	
4	1211-5311-0210-001-0011	
5	1211-5311-0110-101-0031	
6	1211-5311-0110-101-0041 (зеркальные)	
7	1211-5311-0120-001-0031	
8	1211-5311-0120-001-0041 (зеркальные)	
9	1211-5311-0120-002-0091	
10	1211-5311-0120-002-0101 (зеркальные)	
11	1211-5311-0230-003-0071	
12	1211-5311-0230-003-0081 (зеркальные)	

7. 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 прессы FEL позволил определить кинематические зависимости для управления положением его рабочих органов. На основании полученных зависимостей была разработана кинематическая модель и внедрена в процесс разработки технологии обтяжки. Разработанная модель позволяет создавать УП по заданной траектории движения зажимов прессы, в которой могут быть заложены различные схемы деформирования заготовки методом обтяжки.

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 прессы управляющих программ, изменение размеров заготовки и доработку обтяжного пуансона.

Список использованных источников

1. Горбунов, М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов / М.Н. Горбунов – М. : Машиностроение, 1981. – 224 с.
2. Белянин, П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов в США / П.Н. Белянин – М. : Машиностроение, 1979. – 256 с.
3. 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.
4. Вепрев, А.А. Выбор схемы нагружения и скорости ведения процесса поперечной обтяжки / А.А. Вепрев, В.И. Завьялова // Авиационная промышленность. – 1984. – №12.
- Михеев, В.А. Особенности расчета процессов обтяжки деталей сложной формы / В.А. Михеев, Е.В. Чистяков. – Куйбышев, 1981. – № 1209 – С. 10.
5. Михеев, В.А., Гречникова, А.Ф. Управление процессами формообразования анизотропной листовой заготовки за счет создания условий симметричной обтяжки: учеб. пособие / В.А. Михеев, А.Ф. Гречникова. – 2-е изд., доп. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. –116 с.

6. 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.
7. 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.
8. 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.