

А. А. Кривенко, К. С. Бормотин, А. А. Буренин

## ФОРМУЛИРОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБШИВОК ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ В УСЛОВИЯХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

**Аннотация.** 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, FET, кинематический анализ, прямая и обратная задачи кинематики, задача оптимизации, метод конечных элементов, натурный эксперимент.

DOI: 10.37972/chgpu.2022.53.3.007

УДК: 539.3, 517.97, 621.7.043

### Введение

© Кривенко А. А., Бормотин К. С., Буренин А. А., 2022

*Кривенко Антон Александрович*

e-mail: baikal-190@yandex.ru, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

*Бормотин Константин Сергеевич*

e-mail: cvmi@knastu.ru, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Авиастроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

*Буренин Анатолий Александрович*

e-mail: aab@imim.ru, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 21-11-00165.

Поступила 17.11.2022

В производстве деталей летательных аппаратов, составляющих внешние поверхности аэродинамических обводов планера, широко применяется процесс формирования 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 числовым программным управлением (ЧПУ) включает [1]:

- выбор обтяжного оборудования;
- проектирование оснастки;
- разработку технологического процесса изготовления детали;
- разработку управляющих программ (УП) 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 УП для ЧПУ обтяжного оборудования фирмы АСВ выполняется с использованием САМ-системы S3F, которая выполняет моделирование процесса формообразования заготовки и транслирует траектории движения рабочих органов пресса в управляющий код для соответствующей модели пресса [2].

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 к 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, потребуются дополнительный пересчет УП с новыми параметрами размера заготовки или положения пуансона на столе пресса. Таким образом, 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 САМ-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 САМ-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 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], [4], [5], [6], [7], [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], [10], [11].

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.

Для реализации предложенного подхода необходимо решить следующие 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.

#### **Кинематический анализ обтяжного пресса FET для моделирования процесса обтяжки**

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. 1). 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. При условии симметрии проведен анализ кинематики одного зажимного устройства обтяжного пресса FET [12], [13].

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 обобщенных координат (длина гидроцилиндра или штанги), а обратная

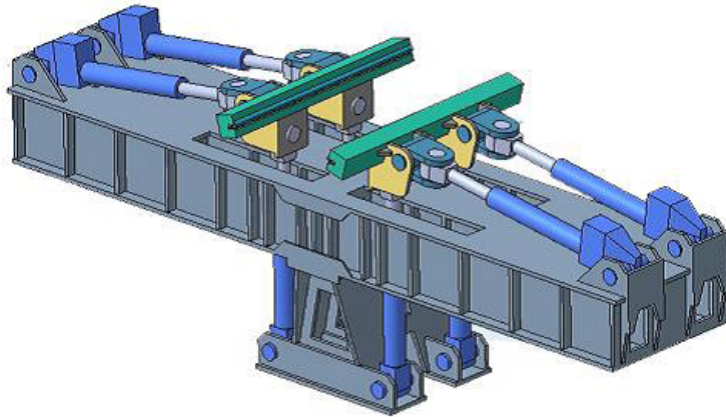


Рис. 1. Внешний вид обтяжного пресса поперечного действия типа FET

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, реализованное на основе матричного аппарата однородных преобразований, заключается в определении длины активных управляющих гидроцилиндров пресса по координатам положения зажимного устройства, реализованное на основе матричного аппарата однородных преобразований. На основе полученных кинематических зависимостей для определения положения рабочих органов обтяжного пресса FET и построенных решений прямой и обратной задач кинематики разработана программа для ПЭВМ FET-NCTrans с реализованной математической моделью системы управления зажимами пресса.

Численное моделирование процесса формообразования обтяжкой листовой заготовки выполняется методом конечных элементов [17] в САЕ-системе MSC.Marc [18]. При постановке задачи учитывается геометрическая, физическая и контактная нелинейность. Граничные условия задаются на основе траектории перемещений зажимов, рассчитанной в FET-NCTrans по заданной УП. FET-NCTrans позволяет определить траектории перемещения зажимов с учетом разного калибровочного растяжения.

Оптимизация траектории движения зажимов обтяжного пресса может быть выполнена численным методом решения задач оптимального управления процессом обтяжки листовой заготовки [19].

#### **Формулировка задачи оптимизации при формообразовании тонкостенных конструкций обтяжкой**

Обозначим через  $x_1, x_2, x_3$  — локальную систему координат панели заготовки, а через  $y_1, y_2, y_3$  — глобальную (исходную) систему координат, задающую расположение пуансона (центр данных систем координат и оси  $x_3, y_3$  совпадают). Таким образом, положение заготовки относительно пуансона определяется углом поворота  $\alpha$  осей  $x_1, x_2$  вокруг  $x_3$  (рис. 2). Задачи деформирования заготовки обтяжкой формулируются в глобальной системе координат  $y_1, y_2, y_3$ .

Пусть  $V(\alpha) \subset R^3$  — область деформируемого тела с границей  $S(\alpha)$ . Область задания краевых смещений —  $S_b(\alpha)$ . Контактная поверхность пуансона с деформируемым

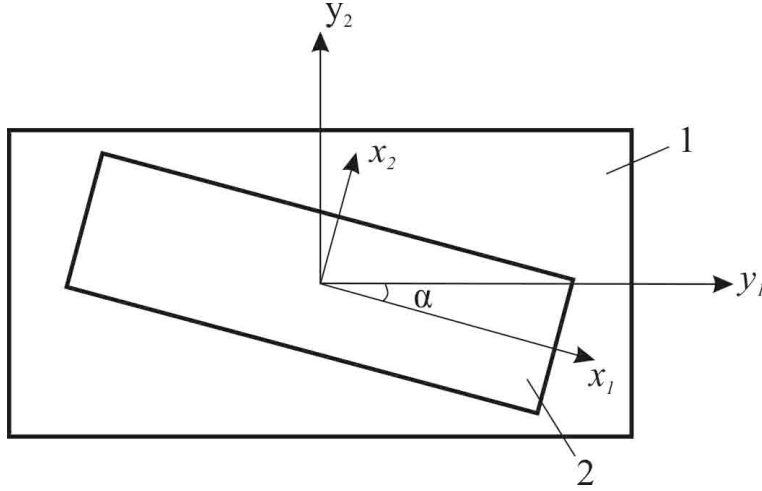


Рис. 2. Расположение детали относительно пуансона (1 — пуансон, 2 — деталь).

телом обозначается через  $S_c(\alpha)$  ( $S_c \subset S$ ). То есть в зависимости от угла поворота  $\alpha$  заготовки относительно пуансона для обеспечения необходимой заданной остаточной формы заготовки будут меняться размеры заготовки, геометрия пуансона и траектория перемещений зажимов (граничные условия на  $S_b(\alpha)$ ). Обозначим через  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ ,  $\tilde{\mathbf{u}} = (\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3)$  — векторы текущих, остаточных перемещений деформируемого тела.

Моделирование процесса обтяжки включает решение задачи деформирования в пластичности и упругой разгрузки. Задачи механики могут формулироваться вариационными принципами с функционалами относительно скоростей (в общей Лагранжевой формулировке (TL) [20], [21]) с учетом параметра  $\alpha$ :

$$J_1(\dot{\mathbf{u}}) = W_c(\alpha) + a(\dot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}), \text{ при } \dot{\mathbf{u}}|_{S_b(\alpha)} = \dot{\mathbf{u}}^*(\alpha), J_2(\dot{\tilde{\mathbf{u}}}) = W_c(\alpha) + a(\dot{\tilde{\mathbf{u}}}, \dot{\tilde{\mathbf{u}}}) \quad (1)$$

где  $W_c$  — контактный потенциал [20], [21]; потенциальные формы  $a(\dot{\mathbf{u}}, \delta\dot{\mathbf{u}}) = \int_V \frac{\partial E(\dot{u}_{i,j})}{\partial \dot{u}_{i,j}} \delta \dot{u}_{i,j} dV$ ,  $a(\dot{\tilde{\mathbf{u}}}, \delta\dot{\tilde{\mathbf{u}}}) = \int_V \frac{\partial \tilde{E}(\dot{\tilde{u}}_{i,j})}{\partial \dot{\tilde{u}}_{i,j}} \delta \dot{\tilde{u}}_{i,j} dV$ ,  $E(\dot{u}_{i,j}) = \frac{1}{2} c_{ijkl} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{kl} - c_{ijkl} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{kl}^p + \frac{1}{2} \sigma_{ij} \dot{u}_{k,i} \dot{u}_{k,j}$ ,  $\tilde{E}(\dot{\tilde{u}}_{i,j}) = \frac{1}{2} c_{ijkl} \dot{\tilde{\epsilon}}_{ij} \dot{\tilde{\epsilon}}_{kl} - c_{ijkl} \dot{\tilde{\epsilon}}_{ij} \dot{\tilde{\epsilon}}_{kl}^p + \frac{1}{2} \tilde{\sigma}_{ij} \dot{\tilde{u}}_{k,i} \dot{\tilde{u}}_{k,j}$ ,  $c_{ijkl}$  — компоненты тензора упругих констант;  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  — компоненты скоростей пластических деформаций ( $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$ ,  $\lambda > 0$ , уравнение  $f = 0$  определяет поверхность текучести в пространстве компонент девiatorа тензора напряжений [20]),  $\dot{\epsilon}_{ij}$ ,  $\dot{\tilde{\epsilon}}_{ij}$  — компоненты скорости текущих и остаточных деформаций Грина-Лагранжа,  $\sigma_{ij}$ ,  $\tilde{\sigma}_{ij}$  — компоненты текущего и остаточного второго тензора напряжений Пиола-Кирхгофа,  $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ,  $i, j, k, l = 1, 2, 3$ .

Задача оптимального деформирования заключается в поиске угла поворота заготовки относительно пуансона, при котором обеспечивались бы минимальные отклонения заготовки после обтяжки и разгрузки от необходимой заданной геометрии детали, вырезанной из заготовки. Данная задача включает уравнения механики деформируемого твердого тела, полученные из условий стационарности (1), функционал оптимизации

$$J_3 = \int_S \sqrt{(\tilde{u}_3(T) - \tilde{u}_3^*)^2} dS \rightarrow \text{inf} \quad (2)$$

и ограничения

$$\mathbf{u}^*(\alpha) \in \mathbf{U}^*, \alpha \in A^*, \quad (3)$$

где  $\tilde{u}_3^*$  — заданные компоненты остаточных перемещений листа по оси  $y_3$  после обтяжки и разгрузки,  $\mathbf{U}^*$  — область возможных функций перемещений зажимов прессового оборудования,  $A^*$  — множество рассматриваемых углов  $\alpha$ .

С учетом дискретизации вариации (1) формируются уравнения конечных элементов для решения контактной задачи [20], [21]

$${}^{t+dt}\mathbf{K}^{(r-1)} \Delta \mathbf{U}^{(r)} = {}^{t+dt}\mathbf{R}^{(r-1)}, {}^{t+dt}\hat{\mathbf{K}}^{(r-1)} \Delta \hat{\mathbf{U}}^{(r)} = {}^{t+dt}\hat{\mathbf{R}}^{(r-1)} \quad (4)$$

где  ${}^{t+dt}\mathbf{K}^{(r-1)}$ ,  ${}^{t+dt}\hat{\mathbf{K}}^{(r-1)}$  — матрицы касательной жесткости (в матрицах включены дополнительные элементы, образующиеся от контактных ограничений),  ${}^{t+dt}\mathbf{R}^{(r-1)}$ ,  ${}^{t+dt}\hat{\mathbf{R}}^{(r-1)}$  — вектор внешних и внутренних сил. Верхние индексы величин  $t + dt$  — значение параметра нагружения,  $(r - 1)$  — номер итерации метода Ньютона-Рафсона. Остаточные узловые перемещения определяются по формуле  $\tilde{\mathbf{U}} = \mathbf{U} + \hat{\mathbf{U}}$ .

Для решения задачи оптимизации наиболее удобно, с учетом применения комплексов программ, использовать методы поиска [22]. В данном случае итерационный алгоритм прямого поиска состоит в задании искомой переменной в виде

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n + \tau \cdot \Delta \alpha \quad (5)$$

(где  $\Delta \alpha$  — заданное значение изменения угла,  $\tau$  — параметр длины шага) и в выполнении следующих этапов расчета:

- Для каждого значения угла проектируется геометрия заготовки и пуансона, на основании которых выполняется разработка управляющих программ для ЧПУ обтяжного оборудования фирмы АСВ с использованием САМ-системы S3F. САМ-система S3F, рассчитав управляющую программу, определяет ее допустимость, т.е. выполняется проверка выполнения ограничений (3). Если управляющая программа не допустима, то происходит переход на следующую итерацию.

- Расчет траектории перемещений зажимов в FET-NCTrans по заданной УП (определяются граничные условия в (1)).

- Расчет задач деформирования в пластичности и упругой разгрузки в системе MSC.Marc (4).

- Расчет критерия (2). Если значение целевой функции улучшается на данной итерации, то ее старое значение заменяется на новое при последующих сравнениях, а итерационный процесс продолжается с данного значения угла. Иначе меняется длина шага и выполняется заново алгоритм.

На отдельных этапах решения возможно уточнение геометрии пуансона (с помощью решения обратной задачи формообразования [23]) и траектории деформирования (граничных условий с помощью решения задач оптимального деформирования [19]).

**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. При решении данной задачи учитываются следующие свойства материала: модуль Юнга  $E = 7000 \text{ кг/мм}^2$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0.34$ , предел текучести  $\sigma_T = 30 \text{ кг/мм}^2$ , упрочнение задается степенной функцией  $\sigma_T = A(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^g$  ( $\varepsilon_0$  — деформации, соответствующие начальному пределу текучести,  $\bar{\varepsilon}^p$  — интенсивность пластических деформаций,  $A$ ,  $g$  — константы материала).

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  $58^\circ$ . На этапе первой итерации расчета управляющей программы 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 оптимальное положение детали для её обтяжки определяется методом (5). Большой угол оборачивания требует поднятия пуансона вверх при минимальных припусках, а загрузка заготовки в захватах требует уменьшение высоты пуансона и увеличения припусков. В связи с этим, при решении задачи оптимизации с множеством рассматриваемых углов  $\alpha$  в диапазоне  $[-2^\circ, 6^\circ]$ , с учетом ограничений на перемещения зажимов прессового оборудования, позиционирование детали в пространстве пресса варьировалось по следующим параметрам:

- перемещение по оси  $y_3$  в диапазоне 1500...1800 мм;
- углы поворота вокруг оси  $y_1$  в диапазоне  $\pm 2^\circ$ ;
- углы поворота вокруг оси  $y_2$  в диапазоне  $\pm 1^\circ$ .

В результате выбраны два наилучших варианта, по которым САМ-система S3F рассчитала УП с наименьшим количеством замечаний (рис. 3):

1. Пуансон №1 устанавливается на высоту 2 м, габариты заготовки  $4,8 \times 1,75 \times 0,01$  м;
2. Пуансон №2 устанавливается на высоту 1,85 м, габариты заготовки  $4,8 \times 2,0 \times 0,01$  м.

Результаты расчета УП для пресса FET-1500 приведены на рис. 4.

Для натурной отработки процесса изготовления окантовки задней двери был выбран вариант №2, как наиболее рациональный процесс. При натурной отработке технологии были обтянуты две заготовки с последующим фрезерованием внутренней гравировки, размерно-химическим травлением наружных поверхностей и контурной вырезкой деталей (рис. 5). В результате были получены 2-е окантовки двери самолета SSJ-NEW соответствующие требуемым геометрическим параметрам.

### **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 оптимальные технологические параметры.

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

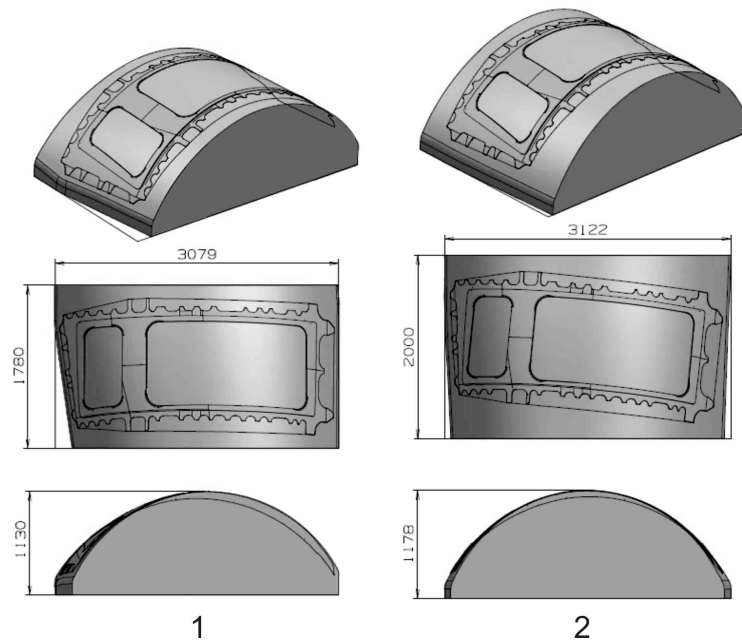


Рис. 3. Варианты обтяжного пуансона (мм)

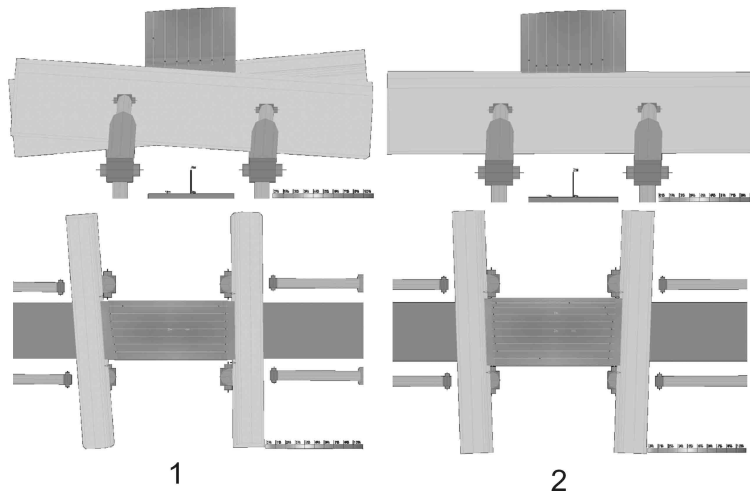


Рис. 4. Результат расчета в S3F процесса обтяжки заготовки на этапе калибровки (вид слева и сверху): 1 — заготовка  $4,8 \times 1,75 \times 0,01$  м, пуансон №1 установлен на высоте 2,0 м; 2 — заготовка  $4,8 \times 2,0 \times 0,01$  м, пуансон №2 установлен на высоте 1,85 м.

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.



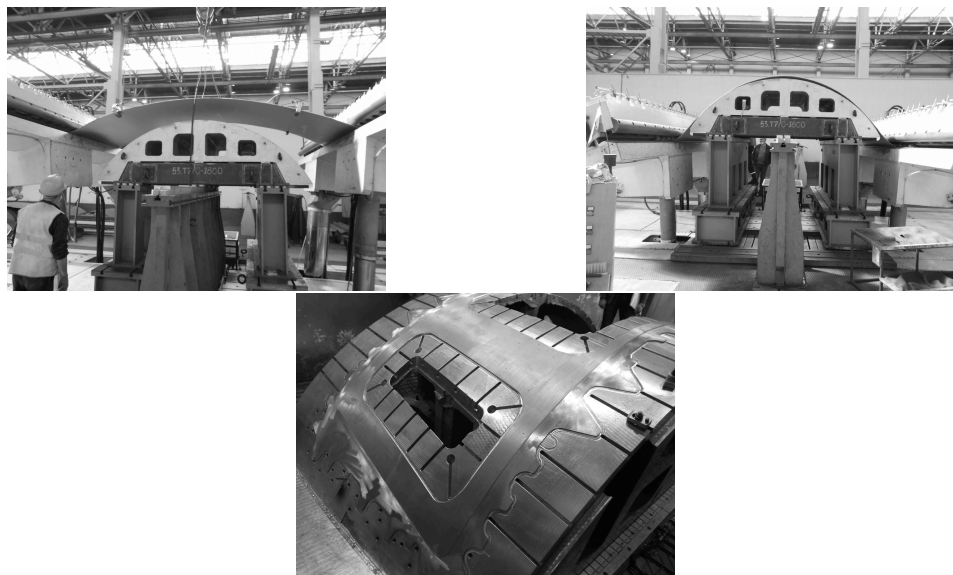


Рис. 5. Результат отработки технологии обтяжки крупногабаритной заготовки и механической обработки окантовки двери.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вайсбург В.А., Медведев Б.А., др. А.Н. Бакумский и. Автоматизация процессов подготовки авиационного производства на базе ЭВМ и оборудования с ЧПУ. Москва: Машиностроение, 1985. 216 с.
- [2] Pogartseva M., Feoktistov S. Technique for the development of the technological process for the tightening of aircraft parts on CNC presses // Materials Science Forum. 2019. no. 945. P. 839–844.
- [3] Моделирование кинетики движения рабочих элементов обтяжного прессы FET / Р.Ф. Крупский, А.А. Кривенко, А.В. Станкевич [и др.] // Вестник ИрГТУ. Механика и машиностроение. 2014. № 9 (92). С. 40–45.
- [4] Кинематический метод обеспечения подготовки управляющих программ ЧПУ обтяжных прессы фирмы ACB-ALSTHOM / В.А. Михеев, С.В. Сурудин, И.В. Науменко [и др.] // Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России: II Всероссийская научно-производственная конференция, приуроченная ко Дню науки. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. С. 35–49.
- [5] Вепрев А.А., Завьялова В.И. Выбор схемы нагружения и скорости ведения процесса поперечной обтяжки // Авиационная промышленность. 1984. № 12. С. 10–11.
- [6] Формообразование профильных заготовок с помощью листового обтяжного прессы / А.А. Кривенко, А.В. Станкевич, С.И. Феоктистов [и др.] // 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. Куйбышев: Куйб. авиац. ин-т, 1981. 10 с.
- [8] Сурудин С.В. Сочетание конечно-элементного моделирования и расчета по аналитическим формулам процессов формообразования обтяжкой // НАЦИОНАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ УЧЕНЫХ (НАУ), Ежемесячный научный журнал. 2015. № 3 (8) ЧАСТЬ 3. с. 139–141.
- [9] Определение положения пуансона в рабочем пространстве обтяжного прессы FET в процессе технологической подготовки производства / С.В. Белых, А.А. Кривенко, В.В. Мироненко [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12(83). с. 36–41.

- [10] Моделирование кинематической схемы последовательной обтяжки оболочек двояковыпуклой формы на обтяжном прессе FEKD / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, С.Г. Дементьев [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. № 16(6). с. 172–179.
- [11] Исследование кинематической схемы последовательной обтяжки оболочек двояковыпуклой формы на обтяжном прессе FEKD / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, С.Г. Дементьев [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. № 16(6). с. 180–186.
- [12] Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры: учебное пособие. Москва: Наука, 1991. 94 с.
- [13] Merlet J. P. Parallel Robots. 2nd ed. The Netherlands: Springer Dordrecht, 2006.
- [14] Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрестной структуры / В.А. Глазуновой, С. Брио, В. Аракелян [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 2. С. 90–100.
- [15] Yang D., Lee T. 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. no. 106. P. 191–198.
- [16] Krivenok A., Burenin A. 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. no. 14(6). p. 1–11.
- [17] Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Мир: Москва, 1984. 428 с.
- [18] Marc 2021, Vol A: Theory and User Information. MSC Software Corporation, 2021.
- [19] Бормотин К.С., Буренин А.А., Кривенок А.А. Об оптимизации кинематической схемы формообразования обтяжкой тонких упругопластических обшивок // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2022. № 2. С. 14–24.
- [20] Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. Изд-во СО РАН: Новосибирск, 2000. 262 с.
- [21] Wriggers P. Computational contact mechanics. Heidelberg: Springer, 2006.
- [22] Химмельблау Д.М. Прикладное нелинейное программирование. Издательство «Мир». Редакция литературы по новой технике: Москва, 1975.
- [23] Бормотин К.С., Вин А. Метод решения обратной задачи в процессе обтяжки панели // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2018. № 3(37). С. 47–57.

*A. A. Krivenok, K. S. Bormotin, A. A. Burenin*

## FORMULATION AND SOLUTION OF THE OPTIMIZING PROBLEM THE SHAPING OF LARGE-SIZED DOUBLE CURVATURE SHEETS UNDER THE CONDITIONS OF PRESSING EQUIPMENT KINEMATIC LIMITATIONS

*Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia*

**Abstract.** To reduce material and time costs for the development and implementation of the technology for the manufacture of double-curvature sheets using the process of stretch-forming sheet workpieces, mathematical models and methods have been developed that allow digital modeling of the forming process and its correction at the early stage of technology development. When developing the technology for manufacturing the door edging on the SSJ-NEW aircraft, new approaches to modeling the forming process were used, which made it possible to determine the most optimal strategy for binding a large-sized workpiece at the limit of the kinematic capabilities of the FET-1500 press. The developed technology allows, within the framework of a computational experiment, to carry out working iterations with the transition to real binding in optimal technological parameters.

**Keywords:** stretch-forming, FET, kinematic analysis, direct and inverse kinematics problems, optimization problem, finite element method, full-scale experiment.

## REFERENCES

- [1] Automation of the processes of preparation of aviation production based on computers and equipment with CNC / V. Weissburg, B. Medvedev, A. Bakumsky et al. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 216 p. (in Russian).
- [2] Pogartseva M., Feoktistov S. Technique for the development of the technological process for the tightening of aircraft parts on CNC presses // Materials Science Forum. 2019. no. 945. P. 839–844.
- [3] Modeling the kinetics of movement of the working elements of the FET tight press / R. Krupsky, A. Krivenok, A. Stankevich et al. // Bulletin of ISTU. Mechanics and engineering. 2014. no. 9 (92). P. 40–45. (in Russian).
- [4] Kinematic method for providing the preparation of control programs for CNC tight presses from ASV-ALSTHOM / V. Mikheev, S. Surudin, I. Naumenko et al. // Science, theory, practice of the aviation industrial cluster of modern Russia: II All-Russian scientific and production conference dedicated to the Day of Science. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2017. (in Russian).
- [5] Veprev A., Zavyalova V. Selection of the loading scheme and the speed of the transverse stretching process // Авиационная промышленность. 1984. no. 12. P. 10–11. (in Russian).
- [6] Shaping of profile blanks using a sheet press / A. Krivenok, A. Stankevich, S. Feoktistov et al. // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-on-Amur gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Sciences about nature and technology. 2013. no. II-1(14). p. 4–8. (in Russian).
- [7] Mikheev V. Peculiarities of calculation of the processes of tightening parts of complex shape. Kuibyshev: Kuib. aviation in-t, 1981. 10 p.
- [8] Surudin S. Combination of finite element modeling and calculation by analytical formulas of the formation processes of a close-fitting // NATIONAL ASSOCIATION OF SCIENTISTS (NAU), Monthly scientific journal. 2015. no. 3 (8) PART 3. p. 139–141. (in Russian).
- [9] Determining the position of the punch in the working space of the FET tight press in the process of technological preparation of production / S. Belykh, A. Krivenok, V. Mironenko et al. // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2013. no. 12(83). p. 36–41. (in Russian).
- [10] Modeling of the kinematic scheme of sequential stretching of biconvex shells on the FEKD stretching press / V. Mikheev, F. Grechnikov, S. Dementiev et al. // Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014. no. 16(6). p. 172–179. (in Russian).
- [11] Investigation of the kinematic scheme of sequential stretching of biconvex shells on the FEKD stretch press / V. Mikheev, F. Grechnikov, S. D. V. Samokhvalov et al. // Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014. no. 16(6). p. 180–186. (in Russian).
- [12] Glazunov V., Koliskor A., Krainev A. Spatial mechanisms of a parallel structure: A Study Guide. Moscow: Nauka, 1991. 94 p.
- [13] Merlet J. P. Parallel Robots. 2nd ed. The Netherlands: Springer Dordrecht, 2006.
- [14] Development of manipulators with a parallel-cross structure / V. Glazunov, S. Briot, V. Arakelyan et al. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2008. no. 2. P. 90–100. (in Russian).
- [15] Yang D., Lee T. 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. no. 106. P. 191–198.
- [16] Krivenok A., Burenin A. 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. no. 14(6). p. 1–11.
- [17] Gallagher R. Finite Element Method. Basics. Mir: Moscow, 1984. 428 p.

---

*Krivenok Anton Alexandrovich*, Candidate of technical sciences, Senior research associate, Komsomolsk - on - Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

*Bormotin Konstantin Sergeevich*, Dr. Sci. Phys. & Math., Associate professor, Professor of the Department of Aircraft Engineering, Komsomolsk - on - Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

*Burenin Anatoly Alexandrovich*, Corresponding member of the RAS, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Chief researcher, Komsomolsk - on - Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

- [18] Marc 2021, Vol A: Theory and User Information. MSC.Software Corporation, 2021.
- [19] Bormotin K., Burenin A., Krivenok A. On the optimization of the kinematic scheme for shaping thin elastoplastic coverings // Mechanics of Solids. 2022. no. 2. P. 214–222.
- [20] Korobeinikov S. Nonlinear deformation of solid bodies. Publishing House of SO RAN: Novosibirsk, 2000. 262 p.
- [21] Wriggers P. Computational contact mechanics. Heidelberg: Springer, 2006.
- [22] Himmelblau D. Applied nonlinear programming. Mir Publishing House. Edition of literature on new technology: Moscow, 1975.
- [23] Bormotin K., A.Win. Method of solving the inverse problem in the process of panel stretch-forming // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I. Yakovlev. Series: Mechanics of the limit state. 2018. no. 3(37). P. 47–57. (in Russian).