

# Механика

УДК 539.3, 539.52

## Расчет кинематических схем с учетом натяжения при формообразовании обтяжкой тонкостенных конструкций\*

К.С. Бормотин, В.С. Левченко

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

## Calculation of kinematic schemes taking into account tension during stretch-forming of thin-walled structures

K.S. Bormotin, V.S. Levchenko

Komsomolsk-na-Amure State University

Обтяжка — один из способов получения деталей обшивок одинарной и двойной кривизн. Современные обтяжные прессы имеют числовое программное управление, которое позволяет построить эвольвенту движения зажимных губок. Известно, что для плотного прилегания заготовки к пуансону при обтяжке требуется задать натяжение. Распределение растягивающих усилий в заготовке на пуансоне при учете трения неравномерное и может привести к неодинаковому пружинению различных частей заготовки. Разработан способ расчета эвольвенты движения или траектории управляющих органов прессы Т-600 при обтяжке листа с помощью моделирования процесса деформирования заготовки в САЕ-системе. Проведено моделирование процесса обтяжки листа с учетом натяжения. Проанализирована зависимость площади прилегания заготовки к пуансону от силы натяжения. Предложено при расчете траекторий управляющих органов прессы для различных схем обтяжки учитывать натяжение в комбинациях граничных условиях при моделировании процесса деформирования заготовки. Выполнено сравнение траекторий, вычисленных предложенным и геометрическим способами. Предложенный способ расчета траекторий деформирования позволяет учесть геометрическую и физическую нелинейность, корректно определить уровень деформаций, напряжений и выбрать оптимальный вариант.

EDN: AWWQQQ, <https://elibrary/awwqqq>

**Ключевые слова:** упругопластичное деформирование, обтяжка листа, сила натяжения, метод конечных элементов, САЕ-система

One of the methods for producing single and double curvature skin parts is the stretch-forming process. Modern stretching presses have numerical control. To set the control program of the stretching press, it is necessary to construct an involute of the clamping jaws motion. As is known, for a tight fit of the workpiece on the punch during stretch-forming, it is necessary to set the tension. The distribution of tensile forces in the workpiece on the

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00332.

punch, taking into account friction, is uneven and can lead to unequal springback for different parts of the workpiece. The article presents a method for calculating the involute or trajectory of the T-600 press control elements motion of during sheet stretch-forming by simulating the workpiece deformation process in a CAE system. Tension is taken into account when simulating the sheet stretch-forming process. An analysis of the workpiece adjoining area dependence to the punch depending on the magnitude of the tension force is presented. It is proposed to take into account tension in combinations of boundary conditions when modeling the process of the workpiece deformation for calculating the trajectories of the press control elements movement for various stretch-forming schemes. The found trajectories are compared with the trajectories calculated geometrically. The proposed method for calculating deformation trajectories allows taking into account geometric and physical nonlinearity, correctly determining the level of deformations, stresses and choosing the optimal option.

EDN: AWWQQQ, <https://elibrary/awwqqq>

**Keywords:** elastic-plastic deformation, sheet stretch-forming process, tension force, finite element method, CAE system

Для изготовления монолитных панелей двойной кривизны на предприятиях авиационной промышленности применяют обтяжку на прессе. Точность выполнения деталей таким способом зависит от геометрических параметров пуансона и кинематических характеристик управляющих органов обтяжного пресса [1–4]. Последний можно использовать как для изготовления обшивок, так и для гибки профилей с тангенциальным растяжением [5]. Как показывает практика, кинематические схемы обтяжки необходимо корректировать, создавая методики управляющих программ для определенных схем нагружения [6, 7].

Процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки под действием сил трения сопровождается неравномерным растяжением и, соответственно, неодинаковой деформацией по толщине [8]. Исследована зависимость коэффициента трения и утонения разных областей листа при обтяжке с растяжением или предельной деформацией заготовки [9]. Используя данные моделирования методом конечных элементов, на основе модели машинного обучения спрогнозировано качество формования [10].

Для поиска оптимального решения задач формовки листов предложено использовать генетический алгоритм [11] и метод динамического программирования [4].

Существует предложение по адаптивному процессу формования растяжением [12], в котором задействован программный инструмент для вычисления деформации и выбора управления параметрами обтяжного пресса в реальном времени. Деформации определяются по считанным положениям маркеров, размещенных на опреде-

ленных участках заготовки материала. Цель состоит в улучшении значений для скорости перемещения штампа и давления растяжения.

Расчет кинематических схем рассмотрен на примере обтяжного пресса Т-600. Чтобы определить перемещения гидроцилиндров обтяжного пресса и построить управляющую программу обтяжного пуансона, необходимо построить эвольвенту движения зажимных губок относительно стола. В зависимости от устройства пресса координаты узлов траектории захвата следует пересчитывать для соответствующих исполняемых элементов [6, 7].

Предложен вариант построения эвольвенты с помощью определения касательных к пуансону с учетом постоянства длины листа и пренебрежением натяга [13, 14]. Если в схеме присутствует растяжение, то изменяется длина листа в соответствии с заданными линейными деформациями.

В плоскости процесс оборачивания листа сводится к получению геодезической линии, для которой главная нормаль совпадает с нормалью к поверхности. Но, согласно теории механики нити, при таком расположении в ее равновесии на поверхности пуансона с учетом трения или без него требуется натяжение. Неравномерное распределение усилий растяжения в заготовке, расположенной на пуансоне при учете трения [15], может привести к неодинаковому пружинению различных частей заготовки. Таким образом, для построения траектории зажимов при обтяжке листа необходимо учитывать силы трения и натяжения.

Современные САЕ-системы позволяют моделировать процесс обтяжки, используя раз-

личные схемы нагружения, и определять траекторию зажимов. Чтобы учесть этапы растяжения в поиске кинематической схемы формования, необходимо определить направления нормалей к эвольвенте в каждый момент сгибания заготовки. По заданному критерию можно из набора траекторий выбрать наилучший вариант для обтяжки [4]. Чтобы использовать метод оптимизации кинематической схемы, предложенный в статье [4], требуется определить пространство возможных траекторий деформирования.

Цель исследования — разработать способ определения траектории деформирования с помощью моделирования процесса формообразования обтяжкой листа на пуансоне.

Вычисленные в системе Марс траектории деформирования сравнивались с построенными по методу касательных [13, 14] эвольвентами при формообразовании листовых деталей на обтяжном прессе Т-600. Для поиска траекторий деформирования в системе Марс сформулирована и решена следующая обратная задача: определить траекторию зажимов при обтягивании пуансона, при которой будут обеспечены контакт по наибольшей поверхности пуансона и отсутствие пластических деформаций в нейтральном слое листа. Разработанная методика расчета траекторий деформирования с учетом усилий растяжения листовых заготовок позволит уменьшить вероятность гофрообразования при обтяжке.

**Математическая формулировка задачи и метод решения.** Пусть  $V \subset R^3$  — область деформируемого тела с границей  $S$ ;  $S_b$  — область задания краевых смещений и усилий (рис. 1). Введем следующие обозначения:  $S_c$  — контактная поверхность пуансона с деформируемым телом,  $S_c \subset S$ ;  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$  — вектор перемещений деформируемого тела;  $t$  — параметр деформирования.

Моделирование обтяжки листа на пуансоне будем выполнять в общей лагранжевой формулировке [4]. В этом случае задача упругопластического деформирования формулируется вариационным принципом с функционалом относительно скоростей [16, 17]:

$$J(\dot{\mathbf{u}}) = W_c + a(\dot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}) + (\dot{\mathbf{p}} \cdot \dot{\mathbf{u}})_{S_b}. \quad (1)$$

Здесь  $W_c$  — контактный потенциал, учитывающий контактные условия методом множе-

лей Лагранжа или методом штрафных функций [16, 17];

$$a(\dot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}) = \int_V \frac{\partial E(\dot{\mathbf{u}}_{ij})}{\partial \dot{\mathbf{u}}_{ij}} \dot{\mathbf{u}}_{ij} dV$$

— потенциальная форма [16];

$$(\dot{\mathbf{p}} \cdot \dot{\mathbf{u}})_{S_b} = \int_{S_b} \sum_{i=1}^3 \dot{p}_i \dot{u}_i dS,$$

где  $\dot{\mathbf{p}} = (\dot{p}_1, \dot{p}_2, \dot{p}_3)$  — вектор скорости поверхностных усилий.

В выражении (1):

$$E(\dot{\mathbf{u}}_{ij}) = \frac{1}{2} c_{ijkl} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{kl} - c_{ijkl} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{kl}^p + \frac{1}{2} \sigma_{ij} \dot{u}_{ki} \dot{u}_{kj},$$

где  $c_{ijkl}$  — компоненты тензора упругих констант,  $i, j, k, l = 1, 2, 3$ ;  $\dot{\epsilon}_{ij}$  — компоненты скорости деформаций Грина — Лагранжа,  $\dot{\epsilon}_{ij} = (\dot{u}_{ij} + \dot{u}_{ji} + \dot{u}_{ki} u_{kj} + u_{ki} \dot{u}_{kj})/2$ ;  $u_{ij} = \partial u_i / \partial x_j$ ;  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  — компоненты скоростей пластических деформаций,  $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \partial \hat{f} / \partial \sigma_{ij}$  ( $\lambda > 0$ , уравнение  $\hat{f} = 0$  определяет поверхность текучести в пространстве компонент девиатора тензора напряжений [16]);  $\sigma_{ij}$  — компоненты второго тензора напряжений Пиола — Кирхгофа).

С учетом дискретизации вариации функционала (1) формируем уравнения конечных элементов для решения контактной задачи [16, 17]

$${}^{t+dt} \mathbf{K}^{(r-1)} \Delta \mathbf{U}^{(r)} = {}^{t+dt} \mathbf{R}^{(r-1)}, \quad (2)$$

где  ${}^{t+dt} \mathbf{K}^{(r-1)}$  — матрицы касательной жесткости (в состав матриц включены дополнительные элементы, образующиеся от контактных ограничений),  $t + dt$  — значение параметра нагружения,  $(r-1)$  — номер итерации метода Ньютона — Рафсона;  $\Delta \mathbf{U}^{(r)}$  — вектор приращений узловых перемещений на итерациях;  ${}^{t+dt} \mathbf{R}^{(r-1)}$  — вектор внешних и внутренних сил.

При расчете методом конечных элементов по формуле (2) на каждой итерации проверяется проникновение узлов одного тела в другое.

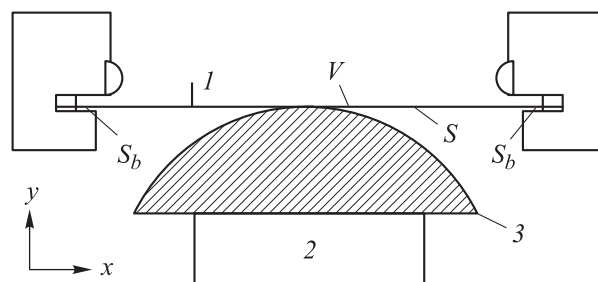


Рис. 1. Модель обтяжного пресса:  
1 — заготовка из листа; 2 — пуансон;  
3 — контрольная точка

Если имеется проникновение, то данные узлы входят в  $S_c$ , и выражение (1) учитывает контактный потенциал по  $S_c$  [16, 17].

Для поиска эволюенты необходимо решить следующую обратную задачу: определить силу натяжения листа при обтяжке пуансона, при которой будут обеспечены контакт по наибольшей части поверхности пуансона и отсутствие пластических деформаций в нейтральном слое листа:

$$\int_{S_c} dS \rightarrow \max; \quad \varepsilon_{ij}^p(\mathbf{x}) = 0; \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad i, j = 1, 2, 3.$$

В целях упрощения будем рассматривать линейную зависимость силы натяжения от параметра нагружения  $t$ . Для модели, показанной на рис. 1, рассматриваем плоскую задачу, силу натяжения листа находим методом последовательных приближений

$$\dot{p}_1^{n+1} = \dot{p}_1^n + \Delta \dot{p}, \quad \dot{p}_1^0 = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

задавая следующие граничные условия:

$$\dot{u}_2|_{S_b} = \dot{u}_2^*; \quad \dot{p}_1|_{S_b} = \dot{p}_1^n.$$

Перемещения при изгибе, заданные условиями  $\dot{u}_2|_{S_b} = \dot{u}_2^*$ , учитываем до момента пересечения телом бульбы (зажима) касательной к пуансону в точке 3 (см. рис. 1) в процессе нагружения.

Согласно формуле (3), итерации продолжают до возникновения пластических деформаций в нейтральном слое листа в области схода с пуансона.

После расчета натяжения  $\dot{p}_1^* = \dot{p}_1^n$  вычисляем различные кинематические схемы. Для разных схем обтяжки в формулировке (1) будем использовать следующие граничные условия:

- для изгиба с последующим растяжением

$$\begin{aligned} \dot{u}_2|_{S_b} = \dot{u}_2^*; \quad \dot{p}_1|_{S_b} = \dot{p}_1^*, \quad t \leq T; \\ \dot{\mathbf{u}}|_{S_b} = (\dot{u}_1^{e1}, \dot{u}_2^{e1}), \quad T < t \leq 2T; \end{aligned} \quad (4)$$

- для растяжения с последующим изгибом

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}|_{S_b} = (\dot{u}_1^{e2}, 0), \quad t \leq T; \\ \dot{u}_2|_{S_b} = \dot{u}_2^*; \quad \dot{p}_1|_{S_b} = \dot{p}_1^*, \quad T < t \leq 2T; \end{aligned} \quad (5)$$

- для растяжения с последующим изгибом и растяжением

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}|_{S_b} = (\dot{u}_1^{e3}, 0), \quad t \leq T; \\ \dot{u}_2|_{S_b} = \dot{u}_2^*; \quad \dot{p}_1|_{S_b} = \dot{p}_1^*, \quad T < t \leq 2T; \\ \dot{\mathbf{u}}|_{S_b} = (\dot{u}_1^{e4}, \dot{u}_2^{e4}), \quad 2T < t \leq 3T, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $T$  — заданное значение параметра нагружения;  $e_1 - e_4$  — заданные значения при растя-

жении для разных кинематических схем и моментов нагружения.

Значения перемещений (скоростей перемещений) ограничены заданными максимальными деформациями при растяжении в той или иной схеме обтяжки.

Направление векторов скорости перемещений  $\dot{\mathbf{u}}|_{S_b} = (\dot{u}_1^{e1}, \dot{u}_2^{e1})$  и  $\dot{\mathbf{u}}|_{S_b} = (\dot{u}_1^{e4}, \dot{u}_2^{e4})$  при растяжении после изгиба определяется по касательной к пуансону в последней точке касания — точке 3 (см. рис. 1).

Анализируя результаты моделирования обтяжки листа с заданными условиями кинематических схем (4)–(6), определяем траектории зажимов.

**Результаты исследования.** Моделирование процесса обтяжки листа проводили методом конечных элементов в системе Marc. Для обеспечения дополнительных условий кинематических схем и вывода требуемых данных были созданы пользовательские подпрограммы. В силу симметрии рассматривали только правую часть листа (см. рис. 1). Заготовку толщиной 3 мм и длиной 1000 мм задавали набором четырех угольных элементов для 2D-анализа. Контактное взаимодействие заготовки с пуансоном на этапе нагружения определяли при коэффициенте трения 0,1. Заготовка имела свойства материала 1163T: модуль Юнга  $E = 6936$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,34$ , предел текучести  $\sigma_T = 294$  МПа; упрочнение задавали степенной функцией.

Контактное тело зажима обтяжного пресса связано с узлом торца деформируемого тела так, что перемещения контактного тела совпадают с перемещениями этого узла.

Чтобы обеспечить натяжение листа и исключить образование гофр, складок, при изгибе задавали растягивающее давление на торце, которое вычисляли методом последовательных приближений по формуле (3). Площадь контакта оценивалась размером  $S_c$ , который при расчете методом конечных элементов определялся количеством узлов листа в контакте.

Зависимости площади контакта от растягивающего давления, полученные в процессе последовательных приближений с учетом и без учета трения, приведены на рис. 2. В результатах исследования присутствует погрешность, связанная с отклонением в пределах 0,1 мм положения тела зажима от касательной к пуансону в точке 3 (см. рис. 1). Решение задачи де-

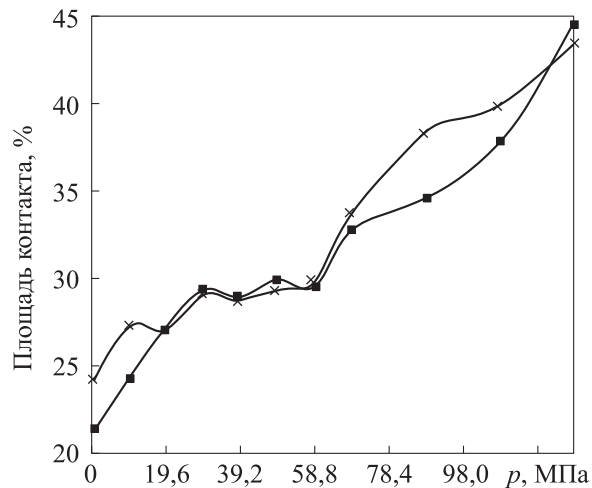


Рис. 2. Зависимости площади контакта от растягивающего давления  $p$  с учетом (■) и без учета (×) трения

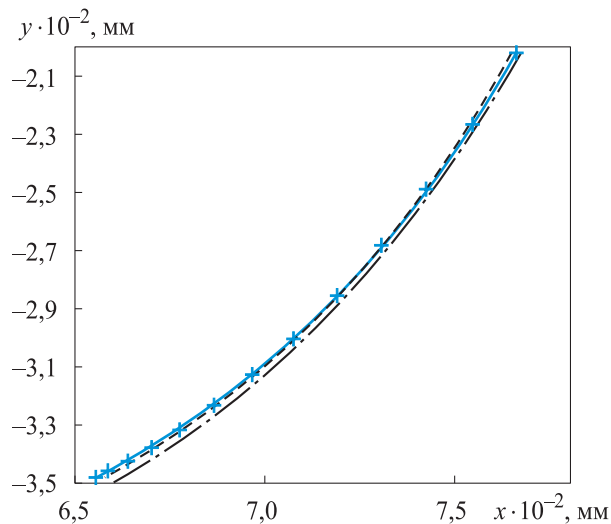


Рис. 3. Траектории зажима при изгибе листа, полученные в среде MathCAD (—+—) и системе Марс при растягивающем давлении  $p = 29,4$  (---) и  $127,5$  МПа (— · —)

формирования заготовки позволяет получить результаты перемещений по компоненте  $x$  ( $x_1$ ). Таким образом, найденные перемещения по координатам  $x$ ,  $y$  ( $x_1$ ,  $x_2$ ) в процессе прижатия заготовки к пуансону позволяют построить эвольвенту движения зажимных губок.

Траектории зажима при изгибе листа, полученные методом касательных в среде MathCAD и методом последовательных приближений при растягивающем давлении  $p = 29,4$  и  $127,5$  МПа в системе Марс приведены на рис. 3. Видно, что кривая при  $p = 29,4$  МПа совпадает с траекторией, построенной методом касательных. При давлении  $p = 29,4$  МПа площадь контакта меньше, чем при  $p = 127,5$  МПа.

Для сравнения предлагаемого подхода с расчетом эвольвенты методом касательных [13] рассмотрена следующая кинематическая схема: растяжение — 2 %, изгиб по пуансону, растяжение — 1,9 %. Задание граничных условий по

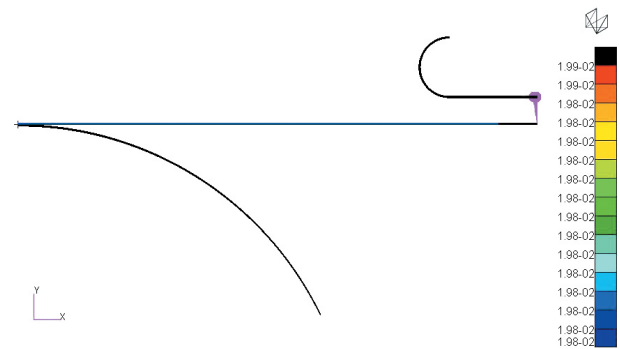


Рис. 4. Модель заготовки перед обтяжкой после растяжения с распределением деформаций по оси  $x$

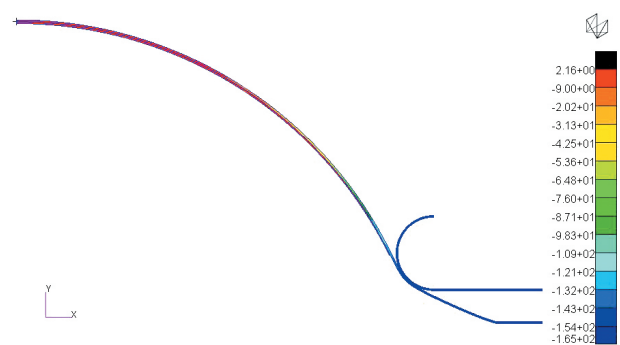


Рис. 5. Модель заготовки в момент ее прижатия к пуансону с распределением перемещений по оси  $x$ , мм

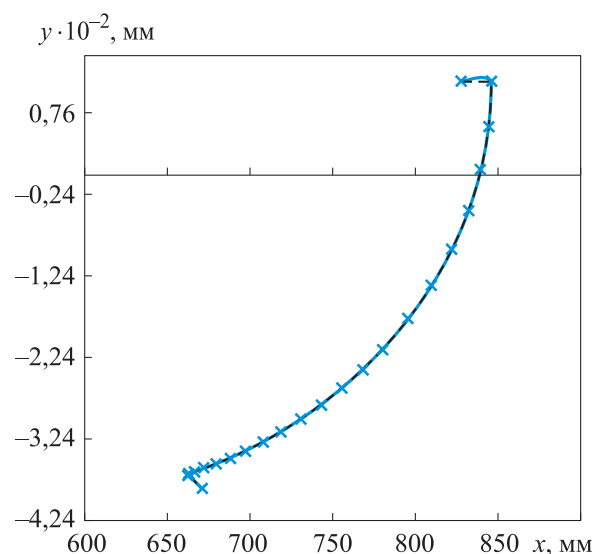


Рис. 6. Траектории зажима при схеме растяжение — изгиб — растяжение, полученные в среде MathCAD (—+—) и системе Марс (---)

схеме (6) с учетом растягивающего давления  $p = 29,4$  МПа требует постановки разных задач с передачей данных о деформированном состоянии заготовки из предыдущих результатов решения.

Модель заготовки после растяжения перед обтяжкой с распределением деформаций по оси  $x$  показана на рис. 4, а модель заготовки в момент ее прижатия к пуансону с распределением перемещений по оси  $x$  — на рис. 5. Траектории, полученные методом касательных в среде MathCAD [13] и путем моделирования процесса обтяжки в системе Marc, приведены на рис. 6.

## Вывод

Рассмотрены подходы построения эвольвенты геометрическим способом в среде MathCAD и моделированием процесса обтяжки в системе Marc. Установлено, что оба способа позволяют построить траекторию зажима прессы с одинаковыми результатами. Однако в системе Marc использованы уравнения механики, учитывающие нелинейные деформации, трение при контакте и натяжение, что дает возможность определить траекторию с лучшим прилеганием листа к пуансону, корректно оценить уровень деформаций и повысить качество детали.

## Литература

- [1] Михеев В.А., Баранова М.М., Тарасов В.А. и др. Решение проблемы формообразования обтяжкой деталей обшивок самолета через внутреннюю геометрию поверхности. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2023, т. 25, № 4, с. 5–12, doi: <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4-5-12>
- [2] Кривенок А.А., Бормотин К.С., Буренин А.А. Формулировка и решение задачи оптимизации формообразования крупногабаритных обшивок двойной кривизны в условиях кинематических ограничений прессового оборудования. *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния*, 2022, № 3, с. 63–74, doi: <https://doi.org/10.37972/chgpu.2022.53.3.007>
- [3] Markovtsev V.A., Karpukhin E.G., Mikheev V.A. et al. Improvement of the processes of forming tight shells of double curvature. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1155, art. 12014, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012014>
- [4] Бормотин К.С., Буренин А.А., Кривенок А.А. Об оптимизации кинематической схемы формообразования обтяжкой тонких упругопластических обшивок. *Известия РАН. МТТ*, 2022, № 2, с. 14–24, doi: <https://doi.org/10.31857/S0572329922020064>
- [5] Крупский Р.Ф., Кривенок А.А., Станкевич А.В. и др. Формообразование профильных заготовок с помощью листового обтяжного прессы. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2013, т. 1, № 2, с. 4–8.
- [6] Pogartseva M.M. Methodology of creating management programs for case presses used in the aviation industry. *Сибирский журнал науки и технологий*, 2017, т. 18, № 2, с. 404–414.
- [7] Krivenok A.A., Burenin A.A. On the parallel kinematics of the FET stretching press in the stretch forming operations in the manufacture of parts with complex spatial geometry. *Журнал СФУ. Математика и физика*, 2021, т. 14, № 6, с. 735–745, doi: <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2021-14-6-735-745>
- [8] Mikheev V.A., Grechnikova A.F., Alvarenga R.D. et al. The clamps of sheet blank movement trajectory simulation under the shell part stretch forming process. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1181, art. 12016, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1181/1/012016>
- [9] Елисеев В.В., Хливненко Л.В., Гольцев А.М. и др. Экспериментальное определение коэффициентов трения по методу обтяжки. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2018, т. 14, № 6, с. 135–139.
- [10] Lu K., Zou T., Luo J. et al. Stretch bending process design by machine learning. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 120, pp. 781–799, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08145-5>
- [11] Schmidt A. Numerical prediction and sequential process optimization in sheet forming based on genetic algorithm. *Mater. Manuf. Process.*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 521–526, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.536926>

- [12] Grigoras C.C., Zichil V., Chirita B. et al. Adaptive stretch-forming process: a computer vision and statistical analysis approach. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 12, art. 357, doi: <https://doi.org/10.3390/machines9120357>
- [13] Погарцева М.М. *Исследование процессов формообразования деталей летательных аппаратов методами изгиба с растяжением и последующим удалением части материала*. Дисс. ... канд. тех. наук. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 2020. 186 с.
- [14] Сурудин С.В. *Разработка способов обтяжки обводообразующих оболочек двойной кривизны применительно к прессам с программным управлением*. Дисс. ... канд. тех. наук. Самара, СГАУ им. С.П. Королева, 2016. 154 с.
- [15] Феоктистов С.И. Определение растягивающих усилий вдоль образующей пуансона с учетом трения при изгибе с растяжением. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2021, № 1, с. 76–82, doi: [https://doi.org/10.17084/20764359\\_2021\\_49\\_76](https://doi.org/10.17084/20764359_2021_49_76)
- [16] Коробейников С.Н. *Нелинейное деформирование твердых тел*. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2000. 261 с.
- [17] Wriggers P. *Computational contact mechanics*. Springer, 2006. 518 p.

## References

- [1] Mikheev V.A., Baranova M.M., Tarasov V.A. et al. Solving the problem of shaping aircraft skin parts by wrapping through the internal geometry of the surface. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Izvestia RAS SamSC]*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 5–12, doi: <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4-5-12> (in Russ.).
- [2] Krivenok A.A., Bormotin K.S., Burenin A.A. Formulation and solution of the optimizing problem the shaping of large-sized double curvature sheets under the conditions of pressing equipment kinematic limitations. *Vestnik ChGPU im. I.Ya. Yakovleva. Ser. Mekhanika predelnogo sostoyaniya [Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State]*, 2022, no. 3, pp. 63–74, doi: <https://doi.org/10.37972/chgpu.2022.53.3.007> (in Russ.).
- [3] Markovtsev V.A., Karpukhin E.G., Mikheev V.A. et al. Improvement of the processes of forming tight shells of double curvature. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1155, art. 12014, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012014>
- [4] Bormotin K.S., Burenin A.A., Krivenok A.A. On the optimization of the kinematic scheme for shaping thin elastoplastic coverings. *Izvestiya RAN. MTT*, 2022, no. 2, pp. 14–24, doi: <https://doi.org/10.31857/S0572329922020064> (in Russ.). (Eng. version: *Mech. Solids*, 2022, vol. 57, no. 2, pp. 214–222, doi: <https://doi.org/10.3103/S0025654422020030>)
- [5] Krupskiy R.F., Krivenok A.A., Stankevich A.V. et al. Shaping profile blanks at a sheet stretch-forming press. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Scientific Notes of Komsomolsk-On-Amour State Technical University]*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 4–8. (In Russ.).
- [6] Pogartseva M.M. Methodology of creating management programs for case presses used in the aviation industry. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii [Siberian Journal of Science and Technology]*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 404–414. (In Russ.).
- [7] Krivenok A.A., Burenin A.A. On the parallel kinematics of the FET stretching press in the stretch forming operations in the manufacture of parts with complex spatial geometry. *Zhurnal SFU. Matematika i fizika [Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics]*, 2021, vol. 14, no. 6, pp. 735–745, doi: <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2021-14-6-735-745>
- [8] Mikheev V.A., Grechnikova A.F., Alvarenga R.D. et al. The clamps of sheet blank movement trajectory simulation under the shell part stretch forming process. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1181, art. 12016, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1181/1/012016>
- [9] Eliseev V.V., Khlivnenko L.V., Goltsev A.M. et al. Experimental determination of friction coefficient by stretch-forming method. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Voronezh State Technical University]*, 2018, vol. 14, no. 6, pp. 135–139. (In Russ.).

- [10] Lu K., Zou T., Luo J. et al. Stretch bending process design by machine learning. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 120, pp. 781–799, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08145-5>
- [11] Schmidt A. Numerical prediction and sequential process optimization in sheet forming based on genetic algorithm. *Mater. Manuf. Process.*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 521–526, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.536926>
- [12] Grigoras C.C., Zichil V., Chirita B. et al. Adaptive stretch-forming process: a computer vision and statistical analysis approach. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 12, art. 357, doi: <https://doi.org/10.3390/machines9120357>
- [13] Pogartseva M.M. *Issledovanie protsessov formoobrazovaniya detaley letatelnykh apparatov metodami izgiba s rastyazheniem i posleduyushchim udaleniem chasti materiala*. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of the processes of shaping aircraft parts using bending with stretching and subsequent removal of part of the material. Kand. tech. sci. diss.]. Komsomolsk-na-Amure, KnAGU Publ., 2020. 186 p. (In Russ.).
- [14] Surudin S.V. *Razrabotka sposobov obtyazhki obvodoobrazuyushchikh obolochek dvoynoy krivizny primenitelno k pressam s programmnyy upravleniem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods for tightening double-curved casings as applied to CNC presses. Kand. tech. sci. diss.]. Samara, SGAU im. S.P. Koroleva Publ., 2016. 154 p. (In Russ.).
- [15] Feoktistov S.I. Determination of tensile forces along the generatrix punch taking into account friction during bending with stretching. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Komsomolsk-On-Amour State Technical University], 2021, no. 1, pp. 76–82, doi: [https://doi.org/10.17084/20764359\\_2021\\_49\\_76](https://doi.org/10.17084/20764359_2021_49_76) (in Russ.).
- [16] Korobeynikov C.H. *Nelineynoe deformirovanie tverdykh tel* [Nonlinear deformation of solids]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN Publ., 2000. 261 p. (In Russ.).
- [17] Wriggers P. *Computational contact mechanics*. Springer, 2006. 518 p.

Статья поступила в редакцию 09.08.2025

## Информация об авторах

**БОРМОТИН Константин Сергеевич** — доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование». Кomsomolsk-na-Amure государственный университет (681013, Komsomolsk-na-Amure, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: cvmi@knastu.ru).

**ЛЕВЧЕНКО Владислав Сергеевич** — аспирант кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование». Komsomolsk-na-Amure государственный университет (681013, Komsomolsk-na-Amure, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: levchenko96@gmail.com).

## Information about the authors

**BORMOTIN Konstantin Sergeyevich** — Doctor of Science (Physics and Math), Associate Professor, Professor of the Aircraft Engineering and Computer-aided Design Department. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 27, e-mail: cvmi@knastu.ru).

**LEVCHENKO Vladislav Sergeyevich** — Postgraduate, Aircraft Engineering and Computer-aided Design Department. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 27, e-mail: levchenko96@gmail.com).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бормотин К.С., Левченко В.С. Расчет кинематических схем с учетом натяжения при формообразовании обтяжкой тонкостенных конструкций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 4, с. 3–10.

### Please cite this article in English as:

Bormotin K.S., Levchenko V.S. Calculation of kinematic schemes taking into account tension during stretch-forming of thin-walled structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 4, pp. 3–10.