

УДК 621.98.04 УДК 621.771.01. УДК 621.7.04

Моделирование технологической последовательности раскатки роликами — дробеударное формообразование подкрепленных панелей

А.Е. Пашков, А.А. Пашков, Н.В. Минаев

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Simulation of the Rib rolling — surface shot peening technological sequence of the reinforced panels

A.E. Pashkov, A.A. Pashkov, N.V. Minaev

Irkutsk National Research Technical University

Крупногабаритные (длиной до 30 м) монолитно-фрезерованные обводообразующие панели сложной пространственной формы — одни из самых сложных в изготовлении деталей самолета. Эффективным способом формообразования таких панелей является последовательное выполнение операций обработки дробью их наружной поверхности и раскатки роликами ребер жесткости. Существующие методики определения режимов обработки такой технологической последовательности, построенные на проведении опытных работ на образцах, являются трудоемкими и затратными. Приведены конструктивно-технологические особенности монолитно-фрезерованных панелей самолета и технологии их формообразования, применяемые отечественными и зарубежными предприятиями. Описана усовершенствованная методика расчета режимных параметров процесса раскатки ребер на основе последовательного конечно-элементного моделирования операций обработки детали, предназначенная для подготовки управляющих программ оборудования с ЧПУ. Сформированы необходимые предпосылки для внедрения разработанной технологии на предприятиях отрасли, что повысит их производительность.

EDN: ZAEQZM, <https://elibrary/zaeqzm>**Ключевые слова:** раскатка роликами, дробеударное формообразование, конечно-элементное моделирование

Large-sized (up to 30 m long) monolithic-milled contour-forming panels with a complex spatial shape are among the most difficult aircraft parts in their manufacture. An efficient method in shaping such panels is the sequential shot peening of their outer surface and the stiffness rib rolling. The existing methods for determining processing modes of such a technological sequence are based on the experimental work on samples, and appear to be labor-intensive and costly. The paper presents design and technological features of the monolithic-milled aircraft panels and technologies for their shaping, applied by the domestic and foreign enterprises. It describes an improved technique for computing the rib rolling process parameters based on the sequential finite element simulation of the part machining. The technique is designed for preparing the CNC equipment control programs. The paper provides prerequisites required in implementation of the developed technology at the industry enterprises, which would increase their productivity.

EDN: ZAEQZM, <https://elibrary/zaeqzm>**Keywords:** rib rolling, surface shot peening, finite element simulation

Конструктивно-технологические особенности деталей. Монолитно-фрезерованная панель самолета (далее — панель) представляет собой конструкцию, в которой обшивка и подкрепляющие ее ребра жесткости выполнены в едином исполнении. Пространственная форма панелей сочетает в себе линейчатые поверхности и участки со знакопеременной двойной кривизной — зоны перегиба. Технология изготовления таких деталей должна обеспечивать требуемую точность аэродинамической формы с отклонениями от теоретического контура до 1 мм. Задача получения высокой точности формы деталей осложнена их конструктивными особенностями — тонкостенностью, наличием подкрепляющих ребер и малой кривизной, для достижения которой требуется общая деформация, соизмеримая с упругой составляющей.

Технология формообразования панелей, применяемая отечественными предприятиями. Для реализации правильно-доводочных и формообразующих операций при изготовлении обводообразующих деталей на отечественных предприятиях применяют, как правило, прессовую гибку в передвижку на универсальных гидравлических прессах с ручным режимом управления с последующей доводкой контура детали обдувкой дробью на ручных дробеструйных установках. Недостатками такой технологии являются низкая точность контура деталей при наличии огранки, высокая трудоемкость и зависимость от квалификации исполнителей.

Формообразование локального перегиба панелей с ребрами жесткости на универсальных гидравлических прессах выполняют с использованием рессорных штампов свободной гибки [1, 2] при большом числе нагружений с постепенной доводкой геометрических параметров панели до требуемых. Информация о точности контура деталей, достигаемой отечественными предприятиями, в открытой печати отсутствует. Оценочно отклонения контура деталей после формообразования составляют 1...5 мм без приложения допустимой нагрузки и 1...2 мм с ее приложением.

Технология формообразования панелей, применяемая за рубежом. Общие сведения об известных зарубежных технологиях приведены в работах [3–10]. Основным способом получе-

ния пространственной формы деталей обшивки является дробеударное формообразование (ДУФ). В работе [3] описано формообразование монолитно-фрезерованных оребренных панелей путем обработки дробью аэродинамической поверхности детали и удлинения ребер. Известен патент США [6], где описан способ формообразования области перегиба ребристых панелей, согласно которому удлинение ребер осуществляется их двусторонней дробеобработкой.

Оборудование для формообразования панелей, представляющее собой дробеструйные или дробеметные установки с внешней системой циркуляции дроби, является технически сложным и дорогостоящим [4]. К достоинствам такого оборудования относятся высокая производительность и возможность программного управления.

В работе [5] отмечено, что применение упомянутого оборудования не может обеспечить необходимую точность формы деталей. Согласно [7], формообразование участков знакопеременной двойной кривизны (седловидной формы) — это многоступенчатый процесс, в котором сочетаются обработка дробью разного диаметра, заневоливание и растяжение кромок.

Предлагаемая технология формообразования панелей. Прогрессивным способом формообразования подкрепленных панелей является отечественная разработка — комбинированная технология, включающая в себя последовательно выполняемые операции раскатки роликами (РР) ребер для формирования кривизны в продольном направлении и ДУФ со стороны аэродинамической поверхности детали для получения поперечной кривизны. При образовании продольной кривизны компенсируют нежелательную продольную компоненту двухосного изгиба, образующуюся после ДУФ.

К преимуществам комбинированной технологии РР–ДУФ перед прессовой гибкой относятся широкие возможности по управлению формой обрабатываемой детали путем бесступенчатого регулирования режимов обработки, более высокие показатели точности формы и производительности, отсутствие такого дефекта, как огранка. При этом полностью исключена вероятность образования трещин.

Эта технология разработана специалистами ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

(ИРННТУ) и апробирована при изготовлении панелей самолетов Ту-204, Ту-334 и Бе-200 [11]. Главным технологическим достоинством разработки является разделение процесса на достаточно простые, но в то же время хорошо управляемые и контролируемые операции получения продольной и поперечной кривизн деталей с обеспечением возможности контроля формы в процессе обработки.

Для выполнения операции ДУФ разработана дробеметная установка контактного типа УДФ-4 с ЧПУ, внедренная в производство на Иркутском авиационном заводе. Имеются публикации с описанием разработанных ИРННТУ методик расчета технологических параметров процесса ДУФ с использованием конечно-элементного моделирования [12, 13].

Для раскатки роликами ребер панелей крыла ИРННТУ разработана и в 2021 г. внедрена на Филиале ПАО «Ил» — Авиастар (г. Ульяновск) специализированная установка для формообразования и правки УФП-1, на которой впервые был апробирован процесс раскатки роликами с ЧПУ (рис. 1).

Процесс раскатки ребер роликами с целью формообразования и правки известен и разрешен к применению при изготовлении авиационных деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов с 70-х годов прошлого века. Однако отраслевые технологические рекомендации по определению параметров данного процесса до настоящего времени не разработаны. Известны исследования [14, 15], в которых расчет кривизны нейтральной поверхности участка оребренной панели выполнен через обжатие краевой зоны ребра. Эти работы представляют научный интерес, однако их практическое применение проблематично в связи со сложностью расчетов.



Рис. 1. Внешний вид установки для формообразования и правки раскаткой роликами УФП-1

Методика расчета параметров процесса РР, ранее разработанная ИРННТУ, основана на эмпирических данных в виде зависимостей, связывающих деформацию конструктивно-подобных образцов (КПО) обрабатываемых деталей с силами, действующими на ребра со стороны роликов [16, 17]. Разработанные рекомендации применяются в производстве авиационных деталей, однако их реализация достаточно трудоемка и требует значительных затрат на проведение опытных работ.

В то же время существуют публикации по конечно-элементному моделированию процесса РР [18, 19]. Они посвящены исследованию процесса правки раскаткой роликами подкрепленных деталей типа профилей и ограничены моделированием напряженно-деформированного состояния образцов небольшого размера.

Цель исследования — совершенствование методики расчета режимных параметров обработки для деталей типа подкрепленных ребрами обводообразующих панелей самолетов в последовательности РР–ДУФ на основе использования конечно-элементного моделирования. Разработка нацелена на создание нормативной основы и программного обеспечения для применения оборудования с программным управлением в комбинированном технологическом процессе формообразования монолитно-фрезерованных панелей.

Материалы и методы исследования. Общие положения. В работе [20] приведена зависимость между компонентами кривизны длинномерных листовых деталей, подвергаемых формообразованию комбинированным методом, который заключается в раздельном получении кривизны в продольном и поперечном направлениях

$$\kappa_y^{\text{ТР}} = \kappa_y^{\text{ДУФ}} + \kappa_y^{\text{уп.ф}},$$

где $\kappa_y^{\text{ТР}}$ — требуемая продольная кривизна обрабатываемого участка детали ($\kappa = 1/R$, R — радиус кривизны); $\kappa_y^{\text{ДУФ}}$ — продольная кривизна, возникающая при ДУФ, выполняемом с целью получения требуемой поперечной кривизны $\kappa_x^{\text{ТР}}$; $\kappa_y^{\text{уп.ф}}$ — продольная кривизна, образующаяся при упругопластическом формообразовании детали; в качестве правила знаков в этом уравнении принято, что положительной является поперечная кривизна.

Запишем это уравнение применительно к панелям с продольным оребрением, подвергае-

мых формообразованию комбинированным методом, в следующем виде:

$$\kappa_y^{\text{ТР}} = \kappa_y^{\text{ДУФ}} + \kappa_y^{\text{РР}}, \quad (1)$$

где $\kappa_y^{\text{РР}}$ — продольная кривизна, возникающая при РР.

В качестве примера определения технологических параметров последовательности РР–ДУФ выполняли конечно-элементное моделирование в системе LS-Dyna процесса формообразования КПО участка панели крыла длиной 250 мм с тремя ребрами. На основе САД-модели панели создавали конечно-элементную модель (КЭМ) КПО, состоящую из 663 600 гексаэдральных элементов и 768 624 узлов (рис. 2).

Для моделирования использовали механические характеристики материала В95пчТ2 (модуль упругости $E = 70\,200$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 457$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$, упругопластическая деформация, соответствующая пределу текучести $\epsilon_{0,2} = 0,0004$, предел прочности $\sigma_b = 630$ МПа) на основе данных, полученных при испытаниях на растяжение по ГОСТ 1497–84 образцов, вырезанных из заготовки в виде плиты в продольном и поперечном направлениях. Модель анизотропного упругопластического материала создавали на основе условия текучести Мизеса — Хилла.

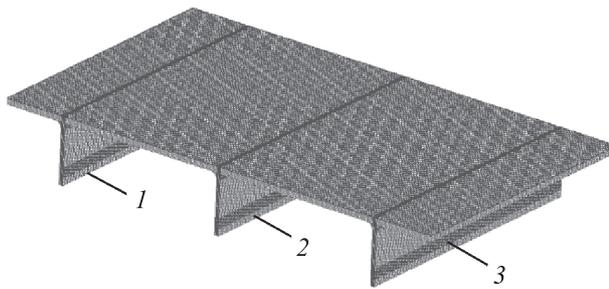


Рис. 2. Конечно-элементная модель КПО участка панели крыла

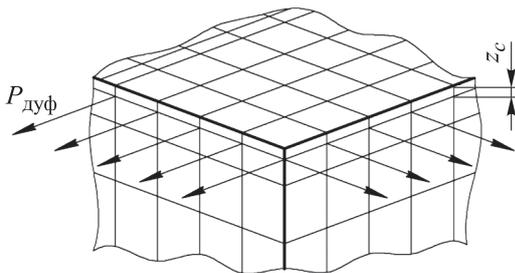


Рис. 3. Схема приложения растягивающей силы $P_{\text{ДУФ}}$ к узлам модели образца

Моделирование процесса дробеударного формообразования. Имитацию процесса ДУФ на установке УДФ-4 дробеметным аппаратом контактного типа ЗД400М с диаметром дробеметного колеса 400 мм осуществляли путем приложения возникающих при обработке дробью растягивающих сил к поверхностному слою модели (рис. 3).

Внутренние силовые факторы процесса ДУФ — удельную растягивающую силу $P_{\text{ДУФ}}$ и расстояние от поверхности детали до точки ее приложения (координату точки ее приложения) z_c — определяли, используя методику, приведенную в работе [21].

Фрагмент базы данных внутренних силовых факторов процесса ДУФ формировали в зависимости от времени обработки t со следующими режимами и условиями процесса: шарики диаметром $D_{\text{др}} = 3,5$ мм из стали ШХ15 (ГОСТ 3722–2014); подача $s = 420, 525, 700, 1050$ и 2100 мм/мин; частота вращения дробеметного колеса $n_{\text{др.к}} = 600, 800$ и 1000 мин⁻¹. Время обработки (воздействия дроби на участок поверхности детали) определяли по формуле $t = l_{3,0}/s$, где $l_{3,0}$ — ширина зоны обработки дробеметного аппарата, $l_{3,0} = 140$ мм.

Эпюры нормальных остаточных напряжений (ОН) σ , полученные путем конечно-элементного моделирования ДУФ по методике, приведенной в работе [12], показаны на рис. 4, где h — толщина полотна детали. Зависимости удельной растягивающей силы $P_{\text{ДУФ}}$, построенные на основе параметров эпюр ОН по методике, описанной в работе [21], от времени обработки t приведены на рис. 5.

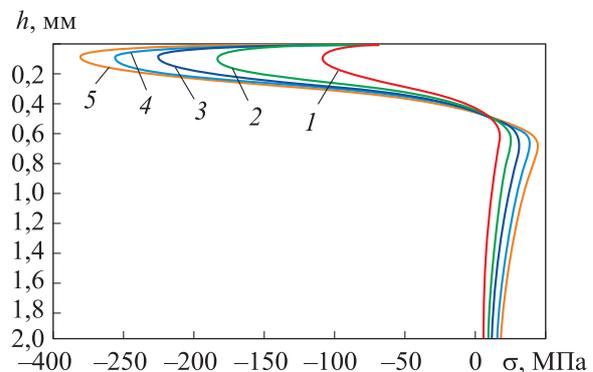


Рис. 4. Эпюры нормальных ОН σ , полученные путем конечно-элементного моделирования ДУФ, при диаметре шариков $D_{\text{др}} = 3,5$ мм, частоте вращения дробеметного колеса $n_{\text{др.к}} = 600$ мин⁻¹ и времени обработки $t = 4$ (1), 8 (2), 12 (3), 16 (4) и 20 с (5)

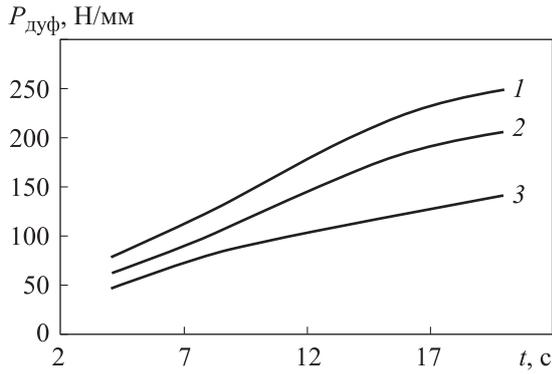


Рис. 5. Зависимость удельной растягивающей силы $P_{дУФ}$ от времени обработки t при частоте вращения дробетного колеса $n_{др.к} = 1000$ (1), 800 (2) и 600 $мин^{-1}$ (3)

Нагружение КПО осуществляли из сформированного фрагмента базы данных методом перебора значений внутренних силовых факторов процесса ДУФ — удельной растягивающей силы $P_{дУФ}$ и координаты точки ее приложения z_c . При деформации КПО векторы силы поворачиваются и продолжают действовать по нормали к плоскости приложения.

Моделирование выполняли с целью определения режимов ДУФ, необходимых для достижения требуемой поперечной кривизны с радиусом $R_x^{TP} = 6$ м ($\kappa_x^{TP} = 0,167$ 1/м) для КПО с линейчатой поверхностью ($\kappa_y^{TP} = 0$), а также с поверхностью знакопеременной двойной кривизны при радиусах $R_x = 6$ м и $R_y = -25$ м. При этом определяли продольную кривизну $\kappa_y^{ДУФ} = 1/R_y^{ДУФ}$, возникающую в процессе ДУФ и подлежащую компенсации при раскатке ребер.

Деформированная после нагружения модель КПО показана на рис. 6.

По результатам моделирования определены:

- режимы ДУФ, необходимые для получения КПО с радиусом одинарной поперечной кривизны $R_x^{TP} = 6$ м: $s = 1050$ мм/мин, $n_{др.к} = 800$ $мин^{-1}$, $t = 8$ с, которым соответствуют внутренние силовые факторы $P_{дУФ} = 101,2$ Н/мм

и $z_c = 0,180$ мм; в результате ДУФ КПО приобрел продольную кривизну с радиусом $R_y^{ДУФ} = 155$ м ($\kappa_y^{ДУФ} = 0,006452$ 1/м), которую необходимо компенсировать раскаткой роликами; с учетом выражения (1) и того, что для КПО с линейчатой поверхностью $\kappa_y^{TP} = 0$, найдена продольная кривизна $\kappa_y^{PP} = -\kappa_y^{ДУФ} = -0,006452$ 1/м;

- режимы ДУФ, требуемые для получения КПО знакопеременной двойной кривизны с радиусами $R_x^{TP} = 6$ м и $R_y^{TP} = 25$ м: $s = 933$ мм/мин, $n_{др.к} = 1000$ $мин^{-1}$, $t = 9$ с, для которых $P_{дУФ} = 139$ Н/мм, $z_c = 0,20$ мм; с учетом компенсации нежелательной продольной кривизны, образовавшейся при ДУФ, $\kappa_y^{PP} = -0,04 - 0,006452 = -0,046452$ 1/м.

Таким образом, путем моделирования процесса ДУФ определены исходные данные для дальнейшего расчета параметров процесса РР в технологической последовательности РР–ДУФ.

Моделирование процесса раскатки роликами.

Так как в результате РР происходит удлинение ребер и детали в целом, представляет интерес определение взаимовлияния соседних ребер при их последовательной обработке. Для этого моделировали процесс нагружения образцов одинаковой длины, содержащих одно и два ребра, растягивающими силами согласно схеме, показанной на рис. 7, а.

Для нахождения степени влияния ребра 2 при нагружении с изменением растягивающей силы F_2 использовали коэффициент взаимовлияния ребер

$$k = f_1 / f_{II}^{(1)},$$

где f_1 — стрела прогиба по оси ребра образца I; $f_{II}^{(1)}$ — стрела прогиба по оси ребра 1 образца II.

Зависимость коэффициента взаимовлияния ребер от отношения стрел прогиба смежных ребер образца II f_{II}^2 / f_{II}^1 показана на рис. 7, б. Видно, что взаимовлияние соседних ребер при

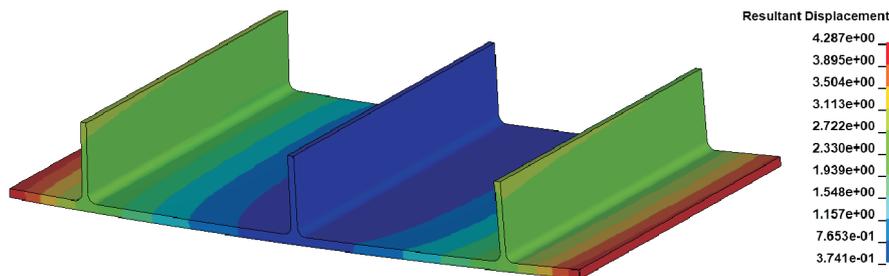


Рис. 6. Деформированная после нагружения модель КПО

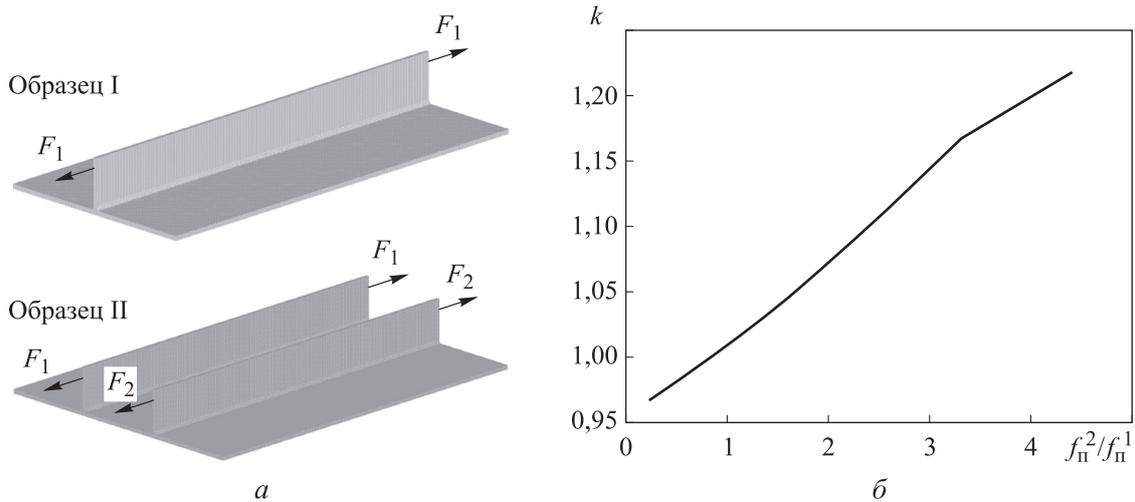


Рис. 7. Схемы нагружения для исследования взаимодействия соседних ребер (а) и зависимость коэффициента взаимодействия ребер k от отношения стрел прогиба смежных ребер образца II f_{II}^2/f_{II}^1 (б) при их последовательной раскатке роликами

их последовательной раскатке роликами становится ощутимым при разнице стрел прогибов более чем в 2 раза. В остальных случаях влияние несущественное, и им можно пренебречь, а расчеты по определению параметров процесса РР выполнять на образцах в виде одного ребра с прилегающими к нему участками полотна шириной, равной расстоянию между соседними ребрами или до края детали.

Технологическими параметрами процесса РР являются глубина вдавливания роликов, расстояние от серединной поверхности сечения детали до оси роликов и длина обрабатываемого участка.

Режимы РР определяли следующим образом. КЭМ КПО разбивали на три конструктивных элемента в виде тавровых образцов с номерами 1–3 (см. рис. 2), представляющих собой ребро с прилегающими участками полотна. Конечно-элементное моделирование процесса РР образцов выполняли согласно рис. 8.

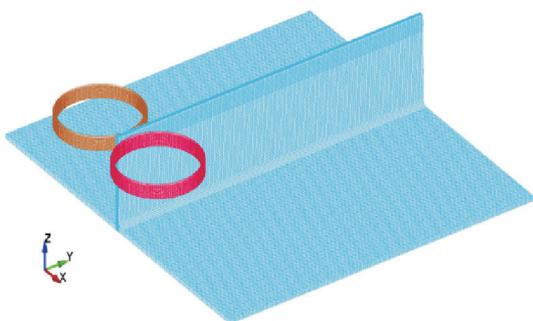


Рис. 8. Конечно-элементная модель раскатки роликами таврового образца

Далее определяли зависимости стрел прогиба образцов f_i (где i — номер образца, $i = 1, 2, 3$) на базе 200 мм от глубины внедрения роликов S .

При моделировании использовали симметричный тип контакта между роликом и заготовкой *автоматическая поверхность — поверхность*. Коэффициент статического трения для расчетной модели выбрали равным 0,61 (алюминий по стали) [22]. Материал роликов приняли абсолютно жестким, так как ролики изготовлены из закаленной стали ШХ15 (предварительное моделирование показало одинаковые результаты при использовании указанных материалов). С учетом рекомендаций [23] использовали восьмиузловые шестигранные элементы с отношением сторон, различающимся более чем в 10 раз (все узлы сетки являлись полностью связанными), и карту настроек SECTION_SOLID ELFORM.

При моделировании глубину внедрения роликов S варьировали в диапазоне 0,02...0,15 мм с шагом 0,005 мм.

По результатам моделирования получены следующие эмпирические зависимости:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= 4133,3S^4 - 115,14S^3 - 9,8874S^2 - \\
 &\quad - 0,7615S - 0,0075; \\
 f_2 &= 3179,5S^4 - 88,57S^3 - 7,6057S^2 - \\
 &\quad - 0,5857S - 0,0058; \\
 f_3 &= 4133,3S^4 - 115,14S^3 - 9,8874S^2 - \\
 &\quad - 0,7615S - 0,0075.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Уравнения (2) позволяют вычислить глубину внедрения роликов, необходимую для достижения заданных значений продольной кривизны в районе ребер КПО.

Для нахождения глубины внедрения роликов при раскатке ребер образца, КЭМ которого показана на рис. 2, использовали зависимость стрелы прогиба f от кривизны k $f = a^2k/8$, где a — база измерения стрелы прогиба, $a = 200$ мм. Установлено, что для достижения расчетной кривизны $k = 0,046452$ 1/м требуются следующие глубины внедрения роликов: $S_1 = 0,0953$ мм, $S_2 = 0,1015$ мм и $S_3 = 0,0953$ мм.

Для определения по найденным значениям глубин внедрения роликов режимов обработки на установке для формообразования и правки раскаткой роликами УФП-1 использовали следующие тарировочные уравнения [24]:

$$f = 22275S^4 - 4515,4S^3 - 403,08S^2 - 14,38S - 0,176; \tag{3}$$

$$f = 0,000004p^4 - 0,0004p^3 - 0,0102p^2 - 0,0572p - 0,1209,$$

где p — давление в рабочем гидроцилиндре устройства для раскатки роликами.

Уравнения (3) составляли для применяемого оборудования и всех видов обрабатываемых материалов путем конечно-элементного моделирования процесса РР и натурных экспериментов по обработке образцов с измерением стрел их прогиба.

Систему уравнений (3) решали подстановкой найденных значений S в первое уравнение с последующим нахождением корней второго уравнения, где искомое значение будет первым положительным вещественным числом.

Совместное решение систем уравнений (2) и (3) позволило определить режимы обработки на установке УФП-1 с целью достижения продольной кривизны $k = 0,046452$ 1/м. Получены следующие давления в рабочем гидроцилиндре, требуемые для раскатки ребер 1–3 (см. рис. 2): $p_1 = 13,2$ МПа, $p_2 = 13,6$ МПа, $p_3 = 13,2$ МПа.

Для повышения производительности вычислений, связанных с конечно-элементным моделированием, разработано специальное программное обеспечение, интерфейс которого показан на рис. 9. Оно обеспечивает пред- и пострасчетную обработку данных, автоматизированный пуск расчета и последующее формирование базы данных из уравнений (2) и (3), связывающих глубину внедрения деформирующих роликов с кривизной тавровых образцов и режимами обработки.

Экспериментальная проверка результатов моделирования. Для проверки разработанной расчетной методики проводили эксперимент по формообразованию в последовательности РР–ДУФ КПО оребренной панели (рис. 10).

КПО, представляющий собой фрагмент реальной детали, изготавливали фрезерованием из сплава В95пчТ2. Для определения режимов обработки использовали САД-модель КПО. Раскатку ребер КПО осуществляли на установ-

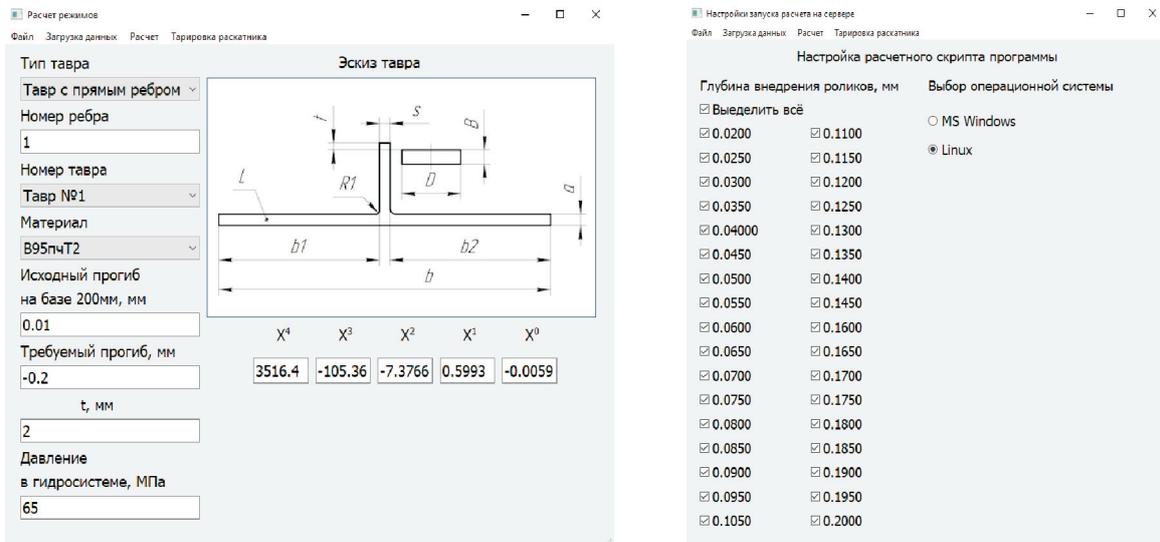
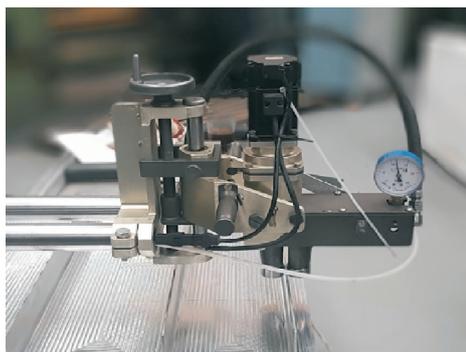


Рис. 9. Интерфейс программы по расчету режимов раскатки роликами



а



б



в

Рис. 10. Экспериментальная проверка предлагаемой методики:
а — изготовленный КПО; б — раскатка ребер КПО; в — дробеударное формообразование КПО

ке УФП-1, дробеударное формообразование — на установке УДФ-4. Измерение стрелы прогиба в контрольных точках КПО проводили индикаторной планкой на базе 200 мм до и после обработки.

Обсуждение результатов. Результаты исследования показали хорошую сходимость данных расчета и измерений КПО после обработки в технологической последовательности РР–ДУФ. Относительные отклонения расчетных стрел прогиба от измеренных в контрольных точках КПО не превышали 8,8 %. Следовательно, разработанную методику можно применять для выполнения технологических расчетов по определению режимов обработки и составлению управляющих программ раскатки ребер роликами на оборудовании с ЧПУ.

Предлагаемую методику предполагается применять в совокупности с комплексом технологического оборудования с ЧПУ для раскатки роликами и ДУФ, разработанным ИРНИТУ, и с программным обеспечением для геометрического анализа 3D-моделей деталей и подготовки исходных данных для цифрового технологического проектирования.

Результатом выполненных работ также является аналитическое и экспериментальное

подтверждение возможности цифрового моделирования основных операций, применяемых при формообразовании деталей типа оребренных панелей комбинированным методом РР–ДУФ. Это позволяет формировать базы данных силовых и деформационных факторов, вызывающих формоизменение типовых конструктивных элементов, которые будут использованы для определения и оптимизации режимов и условий обработки реальных деталей на основе алгоритмов машинного обучения.

Таким образом, сформированы все необходимые предпосылки для внедрения разработанной технологии на предприятиях отрасли, что позволит обеспечить повышение производительности в 2–3 раза с одновременным достижением высоких показателей точности формы деталей.

Выводы

1. Анализ результатов исследования показал хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных (относительные отклонения — не более 8,8 %).

2. Разработанная методика может быть использована для технологических расчетов режимов обработки и составления управляющих

программ для раскатки ребер роликами на оборудовании с ЧПУ.

3. Подтверждена возможность цифрового моделирования операций формообразования деталей типа орбренных панелей методом РР–ДУФ.

4. Сформированы предпосылки для внедрения технологии на предприятиях, что может повысить производительность в 2–3 раза и улучшить точность формы деталей.

Литература

- [1] Шелков В.С., Баушев В.Н. Формообразование монолитных панелей двойной кривизны с ребрами жесткости, расположенными с выпуклой стороны обшивки. *Авиационная промышленность*, 1985, № 9, с. 19–22.
- [2] Белянин П.Н. *Производство широкофюзеляжных самолетов*. Москва, Машиностроение, 1979. 358 с.
- [3] Ramati S., Levasseur G., Kennerknecht S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology. *ICSP-7*, 2000. URL: <http://aerosphere.ca/docs/ICSP-7.pdf> (дата обращения: 15.01.2025).
- [4] Harburn V., Miller J.C. *Shot peen forming of compound contours*. Патент US 4329862. Заявл. 21.01.1980, опубл. 18.05.1982.
- [5] Vaccari J.A. Peen forming enters computer age. *American Machinist*, 1985, no. 6, pp. 91–94.
- [6] Kennerknecht S., Cook D. *Shaped metal panels and forming same by shot peening*. Патент US 6938448. Заявл. 05.09.2001, опубл. 06.09.2005.
- [7] Baughman D. An overview of peen forming technology. *Adv. Surf. Treat. Technol. Appl. Effects*, 1986, no. 3, pp. 209–214.
- [8] Frija M., Hassine T., Fathallah R. et al. Finite element modelling of shot peening process: prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, vol. 426, no. 1–2, pp. 173–180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.097>
- [9] Zhang X.J., Wang J.B., Levers A. et al. Modeling and simulation of shot peening process. *Proc. 37th Int. Matador Conf.*, 2012, pp. 169–176.
- [10] Barrett C.F. *Peen forming*. Metal Improvement Company, 1984. 5 p.
- [11] Пашков А.Е. Технологический комплекс для формообразования длинномерных панелей и обшивок на базе отечественного оборудования. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2014, т. 16, № 1–5, с. 1528–1535.
- [12] Пашков А.А., Пашков А.Е., Чапышев А.П. Дробеударное формообразование обшивок двойной кривизны на дробеметных установках контактного типа с ЧПУ. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2018, т. 22, № 6, с. 34–47, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-34-47>
- [13] Лихачев А.А., Герасимов В.В., Пашков А.А. Реализация системы управления процессом дробеударного формообразования на установках контактного типа. *Вестник ИргТУ*, 2015, № 2, с. 42–47.
- [14] Кононенко В.Г., Сикульский В.Т. Расчет основных технологических параметров гибки монолитных панелей методами локального деформирования ребер. *Обработка металлов давлением в машиностроении*, 1980, № 16, с. 6–10.
- [15] Сикульский В.Т. Формоизменение монолитных панелей локальным деформированием ребер. *Обработка металлов давлением в машиностроении*, 1982, № 18, с. 16–17.
- [16] Макарук А.А. Методика расчета технологических параметров процесса правки фрезерованных деталей каркаса раскаткой роликами. *Вестник ИргТУ*, 2012, № 9, с. 46–50.
- [17] Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки маложестких деталей раскаткой роликами. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2013, т. 15, № 6–2, с. 404–408.
- [18] Lu L., Sun J. Investigation on distortion mechanism and correcting load calculation method for aluminum beam structure by bilateral rolling process. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 57, pp. 781–786, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.135>

- [19] Lu L., Sun J., Li Y. et al. A theoretical model for load prediction in rolling correction process of thin-walled aeronautic parts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92, no. 10–11, pp. 4121–4131, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0420-0>
- [20] Пашков А.Е. *Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей*. Дисс. ... док. тех. наук. Иркутск, ИрГТУ, 2005. 140 с.
- [21] Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В. Исследование начальных напряжений процесса обработки дробью. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2022, т. 20, № 4, с. 120–128, doi: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128>
- [22] Анурьев В.И., Жесткова И.Н., ред. *Справочник конструктора–машиностроителя*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2001. 920 с.
- [23] *Официальный сайт Livermore Software Technology Corporation*. URL: <http://www.lstc.com/products/lstc-dyna>
- [24] Минаев Н.В. К созданию предсказательной модели процесса формообразования и правки подкрепленных панелей раскаткой роликами. *Современные авиационные технологии. Мат. XVI межд. науч.–практ. конф.* Иркутск, ИрГТУ, 2023, с. 15–25. EDN PNHQHS

References

- [1] Shelkov V.S., Baushev V.N. Formation of monolithic panels of double curvature with stiffening ribs located on the convex side of the cladding. *Aviatsionnaya promyshlennost* [Aviation Industry], 1985, no. 9, pp. 19–22. (In Russ.).
- [2] Belyanin P.N. *Proizvodstvo shirokofyuzelyazhnykh samoletov* [Production of wide-body planes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 358 p. (In Russ.).
- [3] Ramati S., Levasseur G., Kennerknecht S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology. *ICSP-7*, 2000. URL: <http://aerosphere.ca/docs/ICSP-7.pdf> (accessed: 15.01.2025).
- [4] Harburn V., Miller J.C. *Shot peen forming of compound contours*. Patent US 4329862. Appl. 21.01.1980, publ. 18.05.1982.
- [5] Vaccari J.A. Peen forming enters computer age. *American Machinist*, 1985, no. 6, pp. 91–94.
- [6] Kennerknecht S., Cook D. *Shaped metal panels and forming same by shot peening*. Patent US 6938448. Appl. 05.09.2001, publ. 06.09.2005.
- [7] Vaughman D. An overview of peen forming technology. *Adv. Surf. Treat. Technol. Appl. Effects*, 1986, no. 3, pp. 209–214.
- [8] Frija M., Hassine T., Fathallah R. et al. Finite element modelling of shot peening process: prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, vol. 426, no. 1–2, pp. 173–180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.097>
- [9] Zhang X.J., Wang J.B., Levers A. et al. Modeling and simulation of shot peening process. *Proc. 37th Int. Matador Conf.*, 2012, pp. 169–176.
- [10] Barrett C.F. *Peen forming*. Metal Improvement Company, 1984. 5 p.
- [11] Pashkov A.E. Technological complex for long-length panels and skins forming on the basis of domestic equipment. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2014, vol. 16, no. 1-5, pp. 1528–1535. (In Russ.).
- [12] Pashkov A.A., Pashkov A.E., Chapyshev A.P. Shot peen forming of double curvature skins using a contact type cnc shotblasting machines. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University.], 2018, vol. 22, no. 6, pp. 34–47, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-34-47> (in Russ.).
- [13] Likhachev A.A., Gerasimov V.V., Pashkov A.A. Implementation of shot peen forming control system on contact type installations. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 2, pp. 42–47. (In Russ.).
- [14] Kononenko V.G., Sikulskiy V.T. Calculation of basic technological parameters of bending of monolithic panels by methods of local deformation of ribs. *Obrabotka metallov davleniem v mashinostroenii*, 1980, no. 16, pp. 6–10. (In Russ.).

- [15] Sikulskiy V.T. Shaping of monolithic panels by local deformation of ribs. *Obrabotka metallov davleniem v mashinostroenii*, 1982, no. 18, pp. 16–17. (In Russ.).
- [16] Makaruk A.A. Methods to calculate technological parameters of shaping milled frame parts by burnishing rollers. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012, no. 9, pp. 46–50. (In Russ.).
- [17] Makaruk A.A., Minaev N.V. Technology of shaping and dressing the low-rigid details by means of roller burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2013, vol. 15, no. 6–2, pp. 404–408. (In Russ.).
- [18] Lu L., Sun J. Investigation on distortion mechanism and correcting load calculation method for aluminum beam structure by bilateral rolling process. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 57, pp. 781–786, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.135>
- [19] Lu L., Sun J., Li Y. et al. A theoretical model for load prediction in rolling correction process of thin-walled aeronautic parts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92, no. 10–11, pp. 4121–4131, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0420-0>
- [20] Pashkov A.E. *Tekhnologicheskie svyazi v protsesse izgotovleniya dlinnomernykh listovykh detaley*. Diss. dok. tekhn. nauk [Technological links in the process of manufacturing of long sheet metal parts. Doc. tech. sci. diss.]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2005. 140 p. (In Russ.).
- [21] Pashkov A.E., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. Development of initial stresses during shot peening. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2022, vol. 20, no. 4, pp. 120–128, doi: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128> (in Russ.).
- [22] Anuryev V.I., Zhestkova I.N., eds. *Spravochnik konstruktora–mashinostroitelya*. T. 1 [Handbook of mechanical engineering designer. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 920 p. (In Russ.).
- [23] Ofitsialnyy sayt Livermore Software Technology Corporation. URL: <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>
- [24] Minaev N.V. [Developing a predictive model of shaping and straightening process of reinforced panels by rolling]. *Sovremennye aviatsionnyye tekhnologii. Mat. XVI mezhd. nauch.–prakt. konf.* [Int. Conf. on Aviation Engineering. Proc. XVI Int. Sci.–Pract. Conf.]. Irkutsk, IrGTU, 2023, pp. 15–25. EDN PNHQHS (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.01.2025

Информация об авторах

ПАШКОВ Андрей Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, директор института авиационного машиностроения и транспорта. ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: pashkov@istu.edu).

ПАШКОВ Александр Андреевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Цифровое проектирование технологических процессов». ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: aa_pashkov@ex.istu.edu).

Information about the authors

PASHKOV Andrey Evgenievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Director of the Institute of Aircraft Engineering and Transport. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: pashkov@istu.edu).

PASHKOV Aleksander Andreevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory Digital Design of Technological Processes. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: aa_pashkov@ex.istu.edu).

МИНАЕВ Николай Владимирович — младший научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств. ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: minaev@istu.edu).

MINAEV Nikolai Vladimirovich — Junior Researcher, Department of Technology and Equipment for Machine Engineering Production. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: minaev@istu.edu).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пашков А.Е., Пашков А.А., Минаев Н.В. Моделирование технологической последовательности раскатки роликами — дробеударное формообразование подкрепленных панелей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 3, с. 57–68.

Please cite this article in English as:

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Minaev N.V. Simulation of the Rib rolling — surface shot peening technological sequence of the reinforced panels. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 3, pp. 57–68.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию
«Технологические процессы
лазерной поверхностной обработки»**

Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров

В монографии в большом объеме рассмотрены лазерные технологические процессы обработки поверхностей металлических деталей и изделий. Описаны технологии лазерной термической обработки сталей, титановых, алюминиевых, медных и других сплавов. Показано влияние параметров режимов непрерывной и импульсной закалки на структуру и получаемые свойства поверхностей. Подробно представлен малоизвестный процесс импульсного ударного упрочнения материалов. Рассмотрены основы физики этого процесса, а также влияние параметров и условий обработки на остаточные напряжения, микроструктуру и механические свойства материала. Большое внимание уделено технологиям модифицирования поверхности лазерным легированием и наплавкой. Приведены результаты исследований и внедренных технологий нанесения порошков из тугоплавких материалов, карбидов и нитридов на поверхность сталей, чугунов и цветных металлов. Показано влияние технологических факторов на структуру, свойства и трещиностойкость нанесенных слоев. Даны физическое представление о процессе лазерного полирования металлических поверхностей различных материалов, а также технология его осуществления.

Для инженерно-технических работников, использующих технологические лазеры, а также для студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>