



## Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка»

© А.А. Макарук, О.В. Самойленко, Ю.Н. Иванов, Н.С. Чащин, Н.В. Минаев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель – установить влияние превентивного деформирования на точность авиационных деталей, изготовленных из термически упрочненного алюминиевого сплава 1933Т2, после дробеударного упрочнения. Определение влияния превентивного предыскажения детали осуществляется на результатах обработки конструктивно-подобных образцов деталей типа «стенка» с различной технологической последовательностью. Первый образец имеет стандартную последовательность изготовления: фрезерование – дробеметное упрочнение – дробеструйная правка. Второй образец обрабатывается по следующей схеме: фрезерование – превентивное деформирование – упрочнение – дробеструйная правка. Деформация образцов определяется в контрольных точках отклонением от плоскостности на основе стрел прогибов. Превентивное деформирование выполняется на ребрах второго образца раскатным устройством. Расчет технологических параметров обработки раскатным устройством основан на принципе суперпозиции отдельных операций, таких как раскатка роликами, дробеструйное упрочнение. Определение параметров превентивного деформирования второго образца основывается на результатах обработки первого образца. Установлено, что отклонение обоих образцов от плоскостности после фрезерования составляет до 2,5 мм. Максимальное отклонение конструктивно-подобного образца № 1 (без превентивного деформирования) после дробеструйной обработки составляет 2,6 мм при наличии высокой степени насыщения поверхности. Максимальное отклонение конструктивно-подобного образца № 2 (с превентивным деформированием) после дробеструйной обработки не превышает 0,4 мм, что соответствует допустимому отклонению детали такой конструкции. Таким образом, способ обработки с внесения в деталь деформации с учетом имеющихся отклонений после фрезерования позволяет достаточно точно минимизировать последующие после дробеупрочнения отклонения от требуемой формы. Анализ результатов проведенных работ подтвердил, что превентивное деформирование детали уменьшает искажения поводок после дробеупрочнения. Следовательно, целесообразно использовать последовательность обработки: превентивное деформирование → упрочнение дробеметным методом → правка-доводка дробеструйным методом.

**Ключевые слова:** раскатка роликами, правка, превентивное деформирование, формообразование, упрочнение, полотно

**Для цитирования:** Макарук А.А., Самойленко О.В., Иванов Ю.Н., Чащин Н.С., Минаев Н.В. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 8–16. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-8-16>

## Methodology for calculating the technological parameters of preventive deformation of the hardened parts of the "wall" type

Alexander A. Makaruk, Oleg V. Samoylenko, Yuri N. Ivanov,  
Nikolay S. Chashchin, Nikolay V. Minaev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The article aims to establish the effect of preventive deformation on the accuracy of aircraft parts made from the thermally hardened aluminium alloy 1933T2, after blasting hardening. Determination of the impact of preventive deformation was carried out by analysing structural parts of the "wall" type produced using various technological sequences. Sample 1 was produced using a standard manufacturing sequence: milling – blasting hardening – blasting correction. Sample 2 was produced as follows: milling – preventive deformation – hardening – blasting correction. The deformation of the samples was determined at checkpoints by deviations from flatness based on bending deflections. In sample 2, preventive deformation was performed on its ridges by a rolling device. The calculation of the technological parameters of the rolling device was conducted following the principle of superposition of individual operations, such as rolling and blasting hardening. The definition of the parameters of preventive deformation of sample 2 was based on the results ob-

tained for sample 1. It was established that, for both samples, the deviation from flatness after milling comprised 2.5 mm. The maximum deviation of sample 1 (without preventive deformation) after blasting hardening was 2.6 mm under a high degree of surface saturation. The maximum deviation of sample 2 (with preventive deformation) after blasting hardening did not exceed 0.4 mm, which corresponds to the acceptable deviation of such structural parts. Thus, the inclusion of the preventive deformation stage in the manufacturing process, with consideration of the deviations resulting from the milling stage, allows minimisation of deviations from the required form after blasting hardening. An analysis of the obtained results confirmed that preventive deformation of structural parts reduces distortions after blasting hardening. Therefore, it is advisable to use the following manufacturing sequence: preventive deformation → hardening by a blasting method → correction by a blasting method.

**Keywords:** rolling, flattening, preventive deformation, shaping, hardening, sheet

**For citation:** Makaruk AA, Samoylenko OV, Ivanov YuN, Chashchin NS, Minaev NV. Methodology for calculating technological parameters of preventive deformation of the hardened parts of the "wall" type. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):8–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-8-16>

## ВВЕДЕНИЕ

Неизбежно возникающие в процессе дробеметного упрочнения отклонения формы тонкостенных деталей каркаса летательных аппаратов, имеющих в своей конструкции продольно-поперечное оребрение и изготавливаемые из термически упрочненного алюминиевого сплава 1933Т2, не всегда в полной мере могут быть устранены последующей правкой дробеструйной обработкой [1–8]. Согласно отраслевой нормативной документации, данный метод является единственно допустимым. Применение традиционных методов правки пластическим деформированием, таких как прессовая обработка, вполне разумно ограничено в связи с требованием по сохранению полученных при упрочнении свойств поверхностного слоя.

Повышение точности изготавливаемых деталей возможно за счет внесения предыскажений еще на этапе правки после фрезерования, величина которых рассчитывается на основе моделирования с использованием нелинейного конечно-элементного анализа [8–14] или определяется на основе производственного опыта по упрочнению деталей такой же или аналогичной конструкции [15–18].

Разработанная комбинированная технология правки-упрочнения подкрепленных ребрами деталей для обеспечения требуемой формы включает в себя следующие основные операции:

– внесение предыскажений формы раскаткой роликами на этапе правки после механообработки;

- упрочнение дробеметным способом;
- дополнительная правка дробеструйным методом.

Целью экспериментального исследования являлся сравнительный анализ результатов упрочнения по двум схемам:

- 1) фрезерование – дробеметное упрочнение – дробеструйная правка;
- 2) фрезерование – превентивное деформирование – упрочнение – дробеструйная правка.

## ХОД ПРОВЕДЕНИЯ

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследования фрезерованием из плиты были изготовлены конструктивно-подобные образцы (КПО) детали «стенка» (рис. 1).

Каждому КПО был присвоен порядковый номер (№ 1, № 2) и нанесена соответствующая маркировка.

Контроль отклонений от плоскости КПО № 1, № 2 выполнялся в контрольных точках (КТ) согласно схеме, показанной на рис. 2.

Исходные (после фрезерования) стрелы прогибов  $f_{\text{исх}}$  определялись в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1, № 2 (см. рис. 2):

$$\begin{aligned}f_1^{\text{исх}_{\text{№1}}(\text{№2})} &= \text{КТ9} - \frac{\text{КТ1+КТ8}}{2}, \\f_2^{\text{исх}_{\text{№1}}(\text{№2})} &= \text{КТ10} - \frac{\text{КТ2+КТ7}}{2}; \\f_3^{\text{исх}_{\text{№1}}(\text{№2})} &= \text{КТ11} - \frac{\text{КТ3+КТ6}}{2}; \\f_4^{\text{исх}_{\text{№1}}(\text{№2})} &= \text{КТ12} - \frac{\text{КТ4+КТ5}}{2},\end{aligned}\quad (1)$$

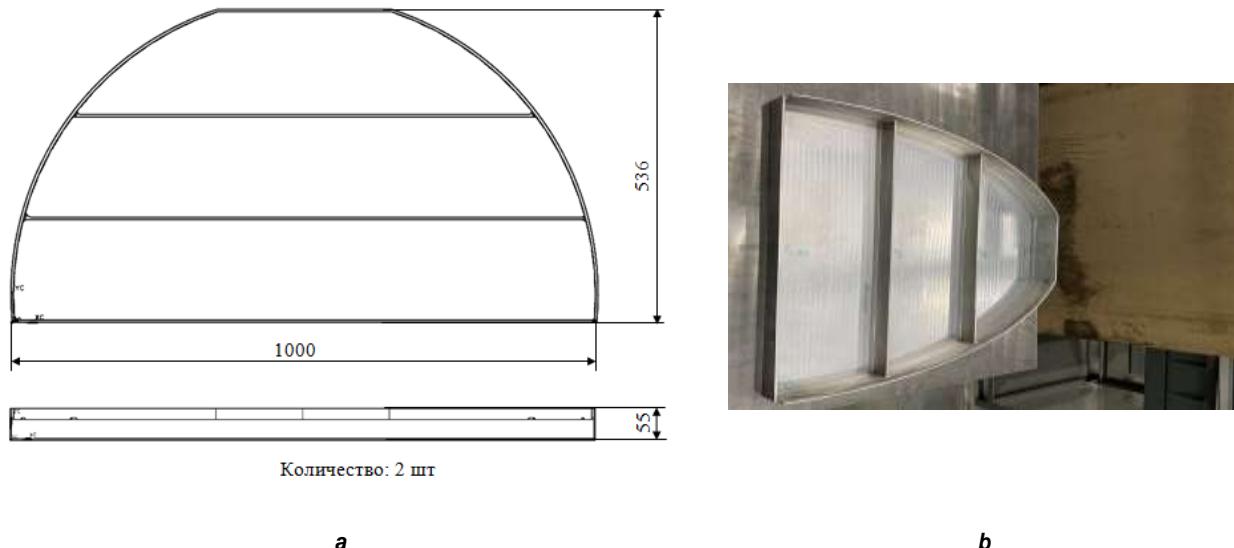


Рис. 1. Конструктивно-подобные образцы детали: а – схема; б – фото  
Fig. 1. Structurally similar samples of the part: a – diagram; b – image

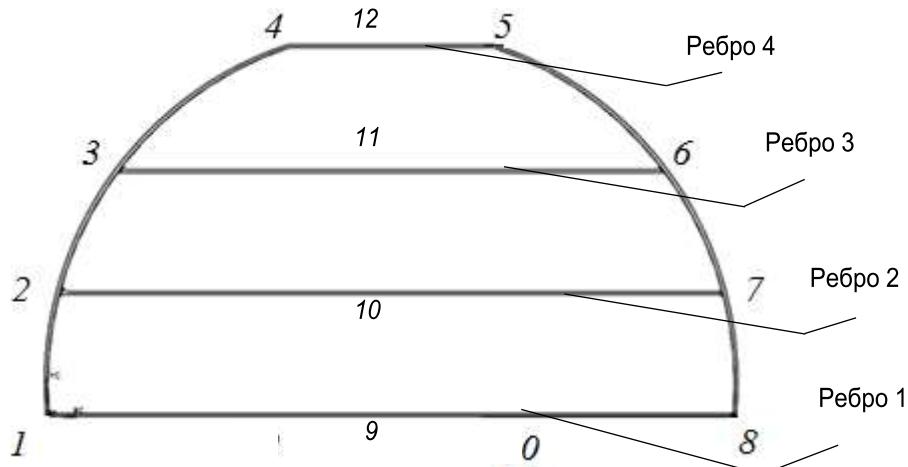


Рис. 2. Схема измерения конструктивно-подобного образца детали  
Fig. 2. Measurement diagram of a structurally similar sample of a part

где  $\text{кт}1 - \text{кт}12$  – отклонение от плоскости в контрольных точках 1–12, соответственно.

Далее было произведено дробеметное упрочнение КПО № 1, согласно технологическому процессу обработки детали «стенка», и выполнен контроль отклонений в КТ. Аналогично формулам (1) были рассчитаны стрелы прогибов после упрочнения  $f_{\text{упр},\text{Nо}1}$  в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1.

На основе полученных значений [1–5] рассчитаны величины прогнозируемой деформации при дробеметном упрочнении в виде стрел прогибов  $f^{\text{прогн}}$  в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1:

$$\begin{aligned}f_1^{\text{прогн}} &= f_1^{\text{упр},\text{Nо}1} - f_1^{\text{исх},\text{Nо}1}; \\f_2^{\text{прогн}} &= f_2^{\text{упр},\text{Nо}1} - f_2^{\text{исх},\text{Nо}1}; \\f_3^{\text{прогн}} &= f_3^{\text{упр},\text{Nо}1} - f_3^{\text{исх},\text{Nо}1}; \\f_4^{\text{прогн}} &= f_4^{\text{упр},\text{Nо}1} - f_4^{\text{исх},\text{Nо}1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для КПО № 2 рассчитаны стрелы прогибов  $f^{\text{раск},\text{Nо}2}$  в продольных сечениях ребер 1–4, которые должны обеспечиваться раскаткой роликами с учетом имеющихся отклонений после фрезерования и возникающих при упрочнении (прогнозируемой деформации), полученных по результатам обработки КПО № 1:

$$\begin{aligned} f_1^{\text{раск. №2}} &= |f_1^{\text{исх. №2}} + f_1^{\text{прогн}}|; \\ f_2^{\text{раск. №2}} &= |f_2^{\text{исх. №2}} + f_2^{\text{прогн}}|; \\ f_3^{\text{раск. №2}} &= |f_3^{\text{исх. №2}} + f_3^{\text{прогн}}|; \\ f_4^{\text{раск. №2}} &= |f_4^{\text{исх. №2}} + f_4^{\text{прогн}}|. \end{aligned} \quad (3)$$

Требуемые при раскатке роликами ребер 1–4 КПО № 2 растягивающие усилия рассчитаны следующим образом:

$$\begin{aligned} F_1^{\text{раск. №2}} &= \frac{8f_1^{\text{раск. №2}} \cdot E \cdot J_1}{l_1^2 \cdot z_1} \cdot 80\%; \\ F_2^{\text{раск. №2}} &= \frac{8f_2^{\text{раск. №2}} \cdot E \cdot J_2}{l_2^2 \cdot z_2} \cdot 80\%; \\ F_3^{\text{раск. №2}} &= \frac{8f_3^{\text{раск. №2}} \cdot E \cdot J_3}{l_3^2 \cdot z_3} \cdot 80\%; \\ F_4^{\text{раск. №2}} &= \frac{8f_4^{\text{раск. №2}} \cdot E \cdot J_4}{l_4^2 \cdot z_4} \cdot 80\%, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $E$  – модуль упругости 1-го рода обрабатываемого материала;  $l$  – длина ребра КПО;  $z$  – расстояние от точки приложения растягивающего усилия, возникающего при раскатке, до центра тяжести поперечного сечения (рис. 3);  $J$  – момент инерции поперечного сечения раскатываемого участка.

Следует учитывать, что для определения моментов инерции поперечных сечений раскатываемых участков использовалось схема, показанная на рис. 4. Согласно этой схеме, сечение КПО разбивалось на 4 зоны, содержащие соответствующее ребро и прилегающие к нему части полотна между смежными ребрами [6–9].

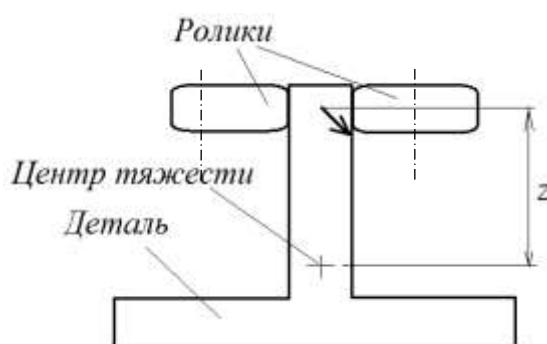


Рис. 3. Схема раскатки ребра конструктивно-подобного образца детали  
 Fig. 3. Diagram of rolling the rib of the structurally similar sample of the part

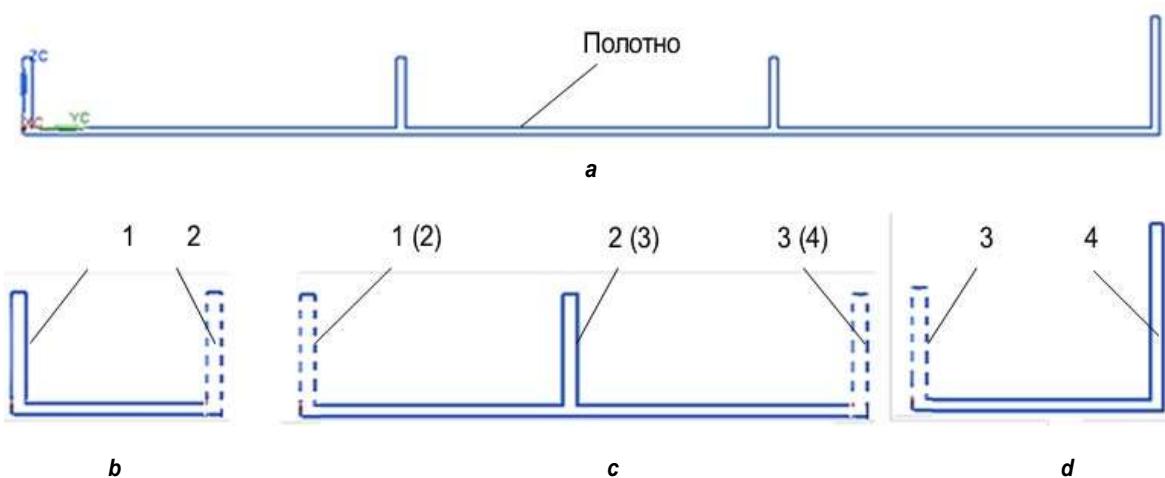


Рис. 4. Общий вид поперечного сечения серединной части конструктивно-подобного образца детали (а), расчетное поперечное сечение участка, образованного ребром 1 (б), расчетные поперечные сечения участков, образованных ребрами 2, 3 (в), расчетное поперечное сечение участка, образованного ребром 4 (д)  
 Fig. 4. General view of the cross section of the middle part of the structurally-similar sample of the part (a), the calculated cross section of the area formed by the rib 1 (b), the calculated cross-sections of the areas formed by the ribs 2, 3 (c), the calculated cross section of the area formed by the rib 4 (d)

Далее для внесения предыскажений формы была произведена раскатка роликами ребер 1–4 КПО № 2 с соответствующими моментами затяжки силового болта раскатника, определенными по растягивающим усилиям с помощью тарировочных графиков; выполнен контроль отклонений в КТ и рассчитаны стрелы прогиба ребер КПО № 2 [3, 4, 10–15]. По результатам измерений был сделан вывод о необходимости дополнительной раскатки ребра 1 с увеличенным моментом затяжки силового болта.

После раскатки было произведено дробеметное упрочнение КПО № 2 (согласно технологическому процессу обработки детали «стенка»), выполнен контроль в КТ, аналогично (1) были рассчитаны стрелы прогибов в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 2 после упрочнения  $f_{\text{упр.} \text{№} 2}$ .

На завершающей стадии эксперимента была произведена правка дробеструйной обработкой КПО № 1, 2, выполнен контроль отклонений в КТ. Аналогично формулам (1) были рассчитаны стрелы прогибов, полученные после дробеструйной обработки  $f_{\text{др.обр.} \text{№} 1(\text{№} 2)}$  в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1, 2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате механической обработки КПО № 1 максимальное отклонение от плоскости составило 2 мм, возросло до 2,75 мм после упрочняющей обработки. В процессе правки при помощи дробеструйной обработки на максимально возможных режимах получилось снизить данное отклонение до 2,6 мм, что свидетельствуют о высокой степени насыщения поверхности и низкой в таком случае эффективности доводки при помощи дробеструйной обработки.

Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1, 2 при обработке показано на рис. 5, 6, соответственно.

Упрочнение КПО № 1 позволило определить прогнозируемую при упрочнении деформацию и на основе этих значений рассчитать требуемые режимы раскатывания (превентивного деформирования) для КПО № 2. Максимальное отклонение КПО № 2 после фрезерования составляло 2,5 мм, после превентивного деформирования и упрочнения оно снизилось до 0,9 мм. В процессе доводки дробеструйной обработкой удалось

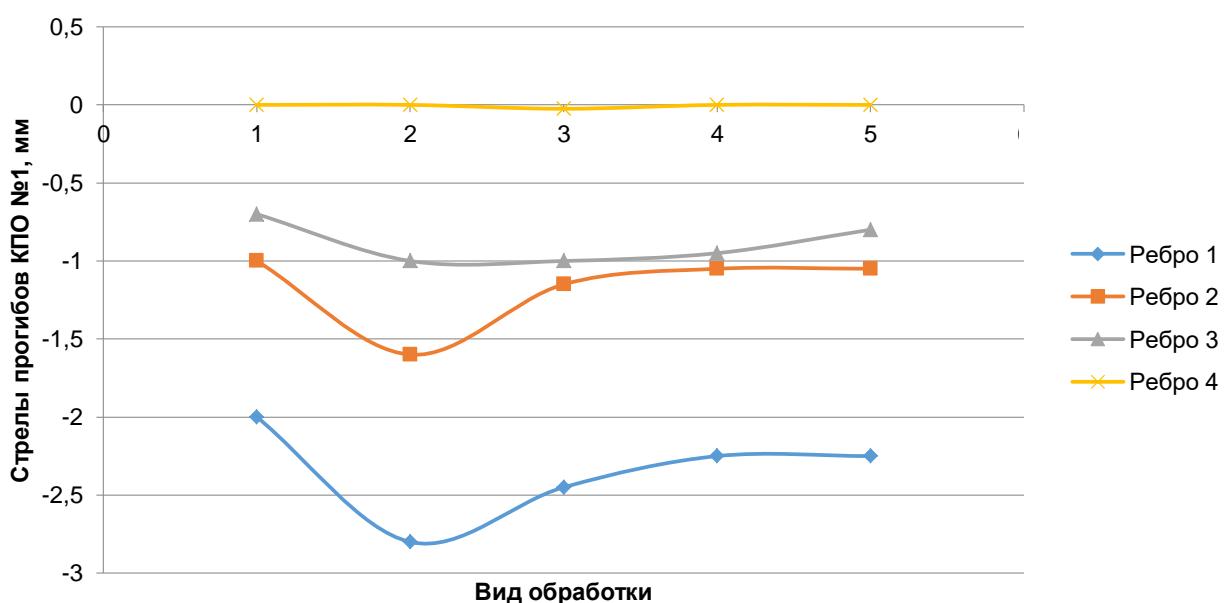


Рис. 5. Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1–4 конструктивно-подобного образца № 1 при обработке: 1 – фрезерование; 2 – упрочняющая обработка; 3–5 – дробеструйная обработка (в т.ч. дополнительная)

Fig. 5. Variations of sagging deflections in the longitudinal sections of the ribs 1–4 of the structurally similar sample no.1 under machining: 1 – milling; 2 – hardening; 3–5 – shot peening (including additional processing)

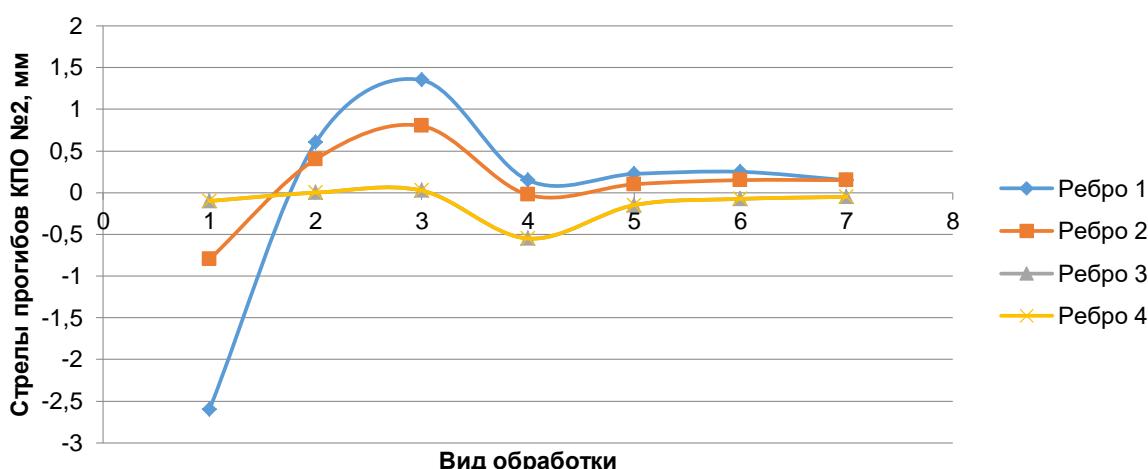


Рис. 6. Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1–4 конструктивно-подобного образца №2 при обработке: 1 – фрезерование; 2 – раскатка роликами (превентивное деформирование); 3 – дополнительная раскатка роликами (превентивное деформирование) ребра

№ 1; 4 – упрочняющая обработка; 5–7 – дробеструйная обработка (в т.ч. дополнительная)  
Fig. 6. Variations of sagging deflections in the longitudinal sections of the ribs 1–4 of a structurally-similar sample no. 2 under machining: 1 – milling; 2 – rolling (preventive deformation); 3 – additional rolling of the rib no.1 (preventive deformation); 4 – hardening; 5–7 – shot peening (including additional processing)

снизить данное отклонение до 0,4 мм, что соответствует допустимому отклонению детали такой конструкции [5, 16–20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа результатов проведенных работ определено, что наиболее оптимальной технологией, позволяющей выполнить упрочнение детали типа «стенка» с выдерживанием ее формы в пределах допуска и соблюдением требований нормативной документации является последовательность: превентивное деформирование → упрочнение дробеметным методом → правка-доводка дробеструйным методом.

С целью повышения производительности процесса внесение предыскажений формы целесообразно объединить с правкой детали после фрезерования. Используя на этих операциях раскатку роликами, можно определять требуемые для получения суммарной

деформации режимы обработки и с высокой точностью производить превентивное деформирование.

Стоит также отметить, что после упрочнения помимо предсказуемых поводок возникают и стохастические, что не позволяет определить такую величину предыскажения, которая полностью бы нивелировалась при упрочнении детали, т.е. в любом случае останется ее «недогиб» или «перегиб». Для гарантированного устранения поводок после упрочнения с превентивным деформированием следует применять правку дробеструйной обработкой ребер, а не полотна. Поэтому необходимо закладывать определенную величину «недогиба» деталей при превентивном деформировании (примерно 80% согласно (4)). Как подтвердило проведение данных экспериментальных работ, это позволяет в итоге добиться требуемой точности.

## Список литературы

1. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки маложестких деталей методами местного пластического деформирования // Материалы Всерос. науч.-практ. семинара с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. С. 117–121.
2. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки маложестких деталей раскаткой роликами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6. С. 404–408.
3. Pashkov A.Ye., Makaruk A.A., Minaev N.V. Automation methods for forming and rectifying stiffened parts with rolling machines // International Journal of Engineering



- and Technology. 2016. Vol. 7. No. 6. P. 2030–2037.
4. Пашков А.А. Автоматизация процесса дробеударного формообразования крупногабаритных панелей на установках контактного типа // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2015. № 4. С. 34–39.
5. Пашков А.Е., Диляк А.Ю. Внутренние силовые факторы процесса дробеметной обработки листовых деталей // Современный университет: образование, наука, культура: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молод. ученых (г. Иркутск, 15 июня 2015 г.). Иркутск, 2005. С. 171–177.
6. Пашков А.Е., Викулова С.В., Вяткин А.С., Макарук А. А. К вопросу обеспечения точности определения интенсивности поверхностного упрочнения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 1. С. 102–107.
7. Беляков В.И., Мовшович А.Я., Кочергин Ю.А. Изготовление листовых деталей методом раскатки // Системи обробки інформації. 2010. Вип. 9. С. 12–14.
8. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 319. P. 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>
9. Murugaratnam K., Utili S., Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for Shot Peening parameter optimization // Advances in Engineering Software. 2015. Vol. 79. P. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.001>
10. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening // Advances in Engineering Software. 2009. Vol. 40. No. 10. P. 1023–1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
11. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot-peened Almen strips // Journal of Engineering Materials and Technology. 2014. Vol. 136. No. 4.
12. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>
13. Starodubtseva D.A., Koltsov V.P., Vinh Le Tri. Grinding of aluminum alloy panels after shot peen forming on contact type installations // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012109>
14. Starodubtseva D.A., Vinh Le Tri, Koltsov V.P. Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web Conference. 2018. Vol. 224. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401070>
15. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Surface roughness formation during shot peen forming // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 327. Iss. 4. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042125>
16. Диляк А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 12. С. 19–25.
17. Охрименко Я.М. Основы технологии горячей штамповки. М.: Машгиз, 1975. 285 с.
18. Беляков В.И. Штамповка на специальном оборудовании. М.: Машгиз, 1983. 79 с.
19. Мовшович А.Я., Буденый М.М., Кочергин Ю.А. Некоторые аспекты унификации обратимой оснастки для металлорежущего оборудования // Энергосбережение. Энергоаудит. 2010. № 1. С. 66–70.
20. Фролов Е.А., Кравченко С.И., Носенко О.Г. Основные тенденции развития высоких технологий в машиностроении // Отраслевое машиностроение, строительство: сб. науч. тр. Вып. 2. Полтава: Изд-во Полтав. нац. техн. ун-та, 2014. С. 3–9.

## References

1. Makaruk AA, Minaev NV. Technology of shaping and straightening of low-rigidity parts by local plastic deformation methods. In: *Materialy Vserossijskogo nauchno-prakticheskogo seminara s mezhdunarodnym uchastiem = Proceedings of All-Russian scientific and practical seminar with international participation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2011, p. 117–121. (In Russ.)
2. Makaruk AA, Minaev NV. Technology of shaping and dressing the low-rigid details by means of roller burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(6):404–408. (In Russ.)
3. Pashkov AYE, Makaruk AA, Minaev NV. Automation methods for forming and rectifying stiffened parts with rolling machines. *International Journal of Engineering and Technology*. 2016;7(6):2030–2037.
4. Pashkov AA. Automation of large-size panel shot-peening on contact-type machines. *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tekhnologicheskoy akademii imeni P.A. Solov'eva = Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technological Academy*. 2015;4:34–39. (In Russ.)
5. Pashkov AE, Diyal AYu. Internal stress factors of the sheet part peen forming process. In: *Sovremennyi universitet: obrazovanie, nauka, kul'tura: sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Modern university: education, science, culture: Proceedings of the international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. Irkutsk; 2005, p. 171–177.
6. Pashkov AE, Vikulova SV, Vyatkin AS, Makaruk AA. Towards achievement of accuracy surface hardening intensity determination. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. Poltava: Poltav. nauch.-tekhn. un-ta, 2014. С. 3–9.

- tem analysis. *Modeling*. 2010;1:102–107. (In Russ.)
7. Belyakov VI, Movshovich AYa, Kochergin YuA. Making of sheet details method of pinning-out. *Sistemi obrobki informacii = Information Processing Systems*. 2010;9:12–14.
8. Tu Rubin, Delbergue D, Miao Hongyan, Klotz T, Brochu M, Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation. *Surface and Coatings Technology*. 2017;319:200–212.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>
9. Murugaratnam K, Utili S, Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for shot peening parameter optimization. *Advances in Engineering Software*. 2015;79:13–26. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.001>
10. Miao HY, Larose S, Perron C, Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(10):1023–1038.  
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
11. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid SA. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot-peened Almen strips. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2014;136(4).  
<https://doi.org/10.1115/1.4028006>
12. Koltsov VP, Vinh Le Tri, Starodubtseva DA. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>
13. Starodubtseva DA, Koltsov VP, Vinh Le Tri. Grinding of aluminum alloy panels after shot peen forming on contact type installations. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632.
- <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012109>
14. Starodubtseva DA, Vinh Le Tri, Koltsov VP. Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web Conference*. 2018;224. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401070>
15. Koltsov VP, Vinh Le Tri, Starodubtseva DA. Surface roughness formation during shot peen forming. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;327(4).  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042125>
16. Diyak AYu. Shot coverage degree estimation by a computer-aided method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;12:19–25. (In Russ.)
17. Ohrimenko YaM. *Basics of die forging technology*. Moscow: Mashgiz; 1975, 285 p. (In Russ.)
18. Belyakov VI. Stamping on special equipment. Moscow: Mashgiz; 1983, 79 p. (In Russ.)
19. Movschovich AJa, Budenny MM, Kochergin JuA. Some aspects of standardization of convertible rigging for metal cutting equipment. *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit = Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2010;1:66–70.
20. Frolov YeA, Kravchenko SI, Nosenko OG. The main tendencies of development of high technology in engineering. In: *Industrial engineering, construction: Collection of scientific works*. Iss. 2. Poltava: Poltava National Technical University; 2014, p. 3–9.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Макарук Александр Александрович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры авиамашиностроения,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: makaruk\_aa@mail.ru

**Самойленко Олег Викторович,**  
научный сотрудник,  
кафедра технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: olegsamoylenko1@gmail.com

**Иванов Юрий Николаевич,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: lv\_uriiy@istu.edu

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexander A. Makaruk,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Aircraft Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: makaruk\_aa@mail.ru

**Oleg V. Samoylenko,**  
Researcher,  
Department of Machine-Building Production  
Technology and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: olegsamoylenko1@gmail.com

**Yuri N. Ivanov,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor  
of the Department of Machine-Building Production  
Technology and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: lv\_uriiy@istu.edu



Чащин Николай Сергеевич,  
научный сотрудник,  
Научно-исследовательская лаборатория обработки,  
ремонта и диагностики композиционных материалов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: chash.nik@ex.istu.edu

Минаев Николай Владимирович,  
научный сотрудник,  
кафедра технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: minaev@istu.edu

Nikolay S. Chashchin,  
Researcher,  
Research Laboratory of Processing, Repair  
and Diagnostics of Composite Materials, Irkutsk National  
Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: chash.nik@ex.istu.edu

Nikolay V. Minaev,  
Researcher,  
Department of Machine-Building Production Technology  
and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: minaev@istu.edu

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный  
вариант рукописи.

*The final manuscript has been read and approved by all  
the co-authors.*

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.12.2020; одобрена  
после рецензирования 15.01.2021; принята к публикации  
26.02.2021.

#### Information about the article

The article was submitted 23.12.2020; approved after  
reviewing 15.01.2021; accepted for publication  
26.02.2021.