

Научная статья
УДК 621.923.4; 629.7.062
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185005>
EDN: <https://www.elibrary.ru/BRLULZ>



Разработка конструкции технологической оснастки из материала с эффектом памяти формы для обработки нежестких деталей летательных аппаратов

Денис Викторович Назаров^{1✉}, Николай Васильевич Носов², Дмитрий Сергеевич Горяинов³

¹ Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Самара, Российская Федерация

^{2, 3} Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация

¹ dennynaz@yandex.ru✉

² nosov.nv@samgtu.ru

³ tmsi@samgtu.ru

Аннотация. Рассматривается возможность применения технологической оснастки с рабочим силовым элементом из материала с эффектом памяти формы для повышения точности базирования тонкостенных прецизионных цилиндрических деталей на финишных операциях механической обработки. Представлена методика проектирования и расчета показателей технологической оснастки для базирования подобного типа деталей. Произведено шлифование опытного образца в условиях базирования на изготовленном опытном образце оправки.

Ключевые слова: волновая зубчатая передача, материал с эффектом памяти формы, базирование тонкостенных прецизионных заготовок

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (Госзадания) FMRW-2025-0052

Для цитирования: Назаров Д.В., Носов Н.В., Горяинов Д.С. Разработка конструкции технологической оснастки из материала с эффектом памяти формы для обработки нежестких деталей летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 196–203. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185005>

Original article

Technological Equipment Development Made of Material with Shape Memory Alloy for Machining Non-Rigid Parts of Aircraft

Denis V. Nazarov^{1✉}, Nikolai V. Nosov², Dmitrii S. Goryainov³

¹ Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation

^{2, 3} Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

¹ dennynaz@yandex.ru✉

² nosov.nv@samgtu.ru

³ tmsi@samgtu.ru

© Назаров Д.В., Носов Н.В., Горяинов Д.С., 2025

Abstract

The article tackles the issue of the technological equipment designing for basing non-rigid workpieces such as bodies of rotation at the stage of finishing machining operations. The machining attachment (mandrel) contains a base element (sleeve), and it is intended for securing a flexible wheel, which is the main element of the wave gear transmission of the spacecraft electromechanical antenna drive. The article describes the technique for designing and indicators computing of the technological rigging for basing such type of the parts. A mandrel prototype was developed and the process of work-out was performed under real production conditions.

The article consists of three main parts, namely the introduction, the main part and conclusions.

The introduction considers the causes of the geometric shape deviations of non-rigid cylindrical parts in the form of the out-of-roundness and tapering associated with of the workpiece deformations occurring while workholding and machining. The authors analyzed various basing schemes options, emerging deformations and their significant impact on the overall processing error. Thus, it is urgent to control the clamping force, ensuring reliable fastening on the one hand, and avoiding unnecessary deformations of the non-rigid workpiece on the other hand.

In the main part, the authors proposed to employ a sleeve made of the TN-1 shape memory alloy as a power element of the rig. Simulation of the interaction process between the TN-1 alloy made sleeve and a thin-walled cylindrical billet is presented as well. The article describes the simulation object, i.e. a thin-walled cylindrical workpiece and a tubular power element made of the TN-1 alloy. The model allows displacement computing of the basing outer cylindrical surface of the element made of a shape-memory material by reference to the amount of deformation induced from the side of the orifice in the radial direction. The design process algorithm for a mandrel with the TN-1 alloy made working part for basing a thin-walled precision cylindrical billet is presented in the form of a block diagram. An experimental study of the basing process of the precision thin-walled billet with an inner orifice of the 85.98 mm diameter with the of 20 microns tolerance made of the 03Cr11Ni8Mo2V material on a mandrel with a base element made of the TN-1 alloy was performed. The article presents a step-by-step description of the thin-walled workpiece installing process on the mandrel with a base element made of the TN-1 alloy by heating and subsequent cooling by dint of the tolerance fields diagram of the outer diameter of the mandrel working part and the orifice diameter of the workpiece. The process of the thin-walled workpiece removing from the mandrel is being performed in the same order. The value of the guaranteed tightness at the maximum diameter of the workpiece orifice is 0.014 mm, which corresponds to the computed pressure in the joint of 0.42 MPa required for guaranteed fastening.

It is noted in the conclusions that application of the developed design of the technological rigging allows creating fixing forces of the required value, ensuring the working stroke stability with its multiple use. Thus, geometric errors in the form of the circularity deviation are being minimized, which enhances the operational indices of the precision parts.

Keywords: wave gear, shape memory alloy, thin-walled precision workpieces basing

Funding: the work was financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Government Assignment (Project No. FMRW-2025-0052)

For citation: Nazarov D.V., Nosov N.V., Goryainov D.S. Technological Equipment Development Made of Material with Shape Memory Alloy for Machining Non-Rigid Parts of Aircraft. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2): 196–203. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185005>

List of Figures

Fig. 1. Typical locating chart on the mandrel with the small cone

Fig. 2. Locating chart on the collet mandrel

Fig. 3. Drawing of the billet

Fig. 4. Drawing of the mandrel for the thin-walled billet basing: 1 – a TN-1 alloy made sleeve; 2 – shank; 3 – screw bolt; 4 – nut; 5 – stop; 6 – mounting mandrel

Fig. 5. Technological rigging designing algorithm with the shape memory alloy application

Fig. 6. Tolerance ranges diagram of the precision thin-walled billet orifice and a mandrel with the shape memory alloy element

Введение

Одной из целей совершенствования современной космической техники является обеспечение ее безотказности и длительного функционирования на орбите, а также снижение массы. Для раскрытия антенн, солнечных батарей, крышки бленды светозащитного устройства наиболее выгодно использовать электромеханические приводы с волновыми зубчатыми передачами (ВЗП). Эти передачи способны передавать большой крутящий момент при незначительной массе редуктора за счет распределения усилий на большое число зубьев, находящихся одновременно в зацеплении [1].

Методикам расчета и проектирования ВЗП посвящено значительное количество работ ученых научной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана [2, 3]. Математическим моделированием функционирования ВЗП занимались отечественные [4] и зарубежные [5–7] исследователи. Вопросы оптимизации параметров ВЗП для аэрокосмической техники рассмотрены в монографии [8]. Но применение ВЗП в конструкциях машин ограничивается из-за поломок ее элементов ввиду недостаточной точности изготовления сопряженных поверхностей деталей передачи [9, 10]. Как показали исследования, главной причиной выхода из строя ВЗП является заклинивание зубьев, ведущее к поломке гибкого колеса или подшипников генератора волн. Гибкое колесо работает в условиях циклических деформаций, а, как известно, одними из факторов, влияющих на предел выносливости, являются качество и точность обработки поверхности. Микронеровности поверхности, образующиеся в результате абразивной обработки, являются потенциальными источниками концентрации напряжений и снижают предел выносливости деталей [16]. Параметры геометрической точности и качества поверхности детали формируются на финишных операциях технологического процесса механической обработки и зависят от того, насколько правильно сконструирована технологическая оснастка и выполнен принцип единства баз как при изготовлении, так и при сборке, для повышения точности замыкающего звена размерной цепи ВЗП. Наличие нежестких деталей (толщина стенки 0,3 ... 1,0 мм) в конструкции ВЗП с высокими требованиями по точности и качеству поверхности требует разработки современного технологического процесса и специальной технологической оснастки.

Технологический процесс изготовления нежестких прецизионных тонкостенных цилиндрических деталей типа стакана является наиболее сложным. Современные прецизионные шлифовальные станки [11, 12] и абразивный инструмент

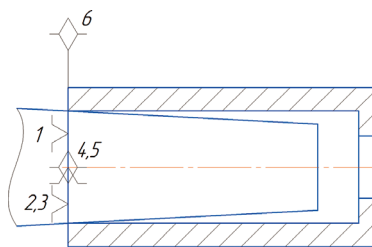


Рис. 1. Типовая схема базирования на оправке с малым конусом

[13, 14] позволяют обеспечить высокую точность и непревышение допустимого уровня шероховатости обработанной поверхности [15]. На производстве обработка заготовок производится на специальной оправке с малой конусностью (схема базирования приведена на рис. 1). Данная схема обеспечивает установку заготовки с нулевой погрешностью базирования только в поперечном направлении. В то же время скрытая установочная база (1, 2, 3) меняет свое положение относительно конической поверхности оправки в зависимости от погрешности диаметра посадочного отверстия, создавая натяг в определенном сечении. Это приводит к возникновению погрешности обрабатываемой поверхности в продольном и поперечном направлениях и появлению овальности и конусообразности.

Одним из вариантов изменения схемы базирования в процессе установки с гарантированным натягом является применение цанговых механизмов крепления заготовки, которые создают двойные направляющие базы. На рис. 2 показана предлагаемая схема установки заготовки на операции окончательной обработки, где опорные точки 1, 2, 3, 4 обеспечивают создание основной технологической базы (двойной направляющей базы): ось заготовки, опорная точка 5 не меняют своего положения в процессе установки, а точка 6 равномерно распределяет натяг по образующей поверхности.

Цанговые оправки широко используются при установке заготовок на отверстиях заготовки, однако при обработке нежестких заготовок такой способ установки не применяется ввиду сложности конструкции технологической оснастки и больших упругих деформаций технологической системы.

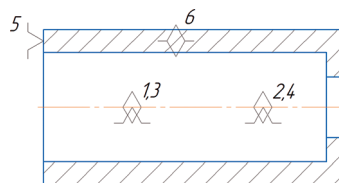


Рис. 2. Схема базирования на цанговой оправке

Постановка задачи исследования

Предложена технологическая оснастка для установки нежестких заготовок и обработки наружной цилиндрической поверхности на шлифовальных станках, в конструкции которой используются детали из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ) [17].

На рис. 3 представлен чертеж нежесткой заготовки с техническими требованиями. Анализ технических требований показал, что основной конструкторской базой является поверхность $\varnothing 85,98^{+0,02}$, которая определяет точность формы и расположение, поэтому при обработке необходимо использовать ось данной поверхности в качестве основной технологической базы (двойной направляющей базы).

В качестве технологической оснастки предлагается цилиндрическая оправка с рабочей частью, выполненной из материала с ЭПФ [18, 19]. Особенностью применения данного материала является условие обеспечения гарантированного натяга при обработке заготовки и гарантированного зазора при снятии заготовки. Эти условия выполняются благодаря изготовлению рабочей части оправки из материала TiNi [20]. Предварительно создают деформации внутренних слоев втулки путем проталкивания дорна, диаметр которого больше, чем диаметр отверстия втулки, вследствие чего наружный диаметр втулки при нагреве уменьшается и создается зазор с обрабатываемой заготовкой. При охлаждении до обычной комнатной температуры наружный диаметр втулки восстанавливается до исходного, и образуется натяг в соединении. Феноменальные свойства такого рода сплавов

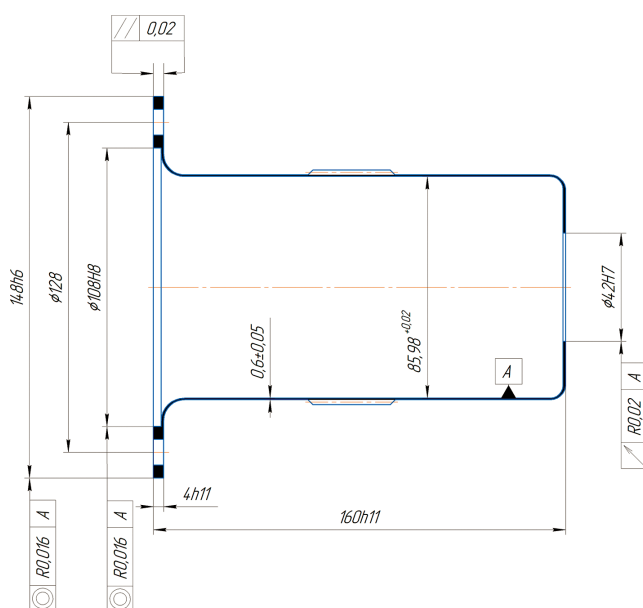


Рис. 3. Чертеж заготовки

способны обеспечить равномерное относительно оси перемещение наружной цилиндрической поверхности и его абсолютную повторяемость.

Моделирование процесса взаимодействия втулки из материала с ЭПФ и тонкостенной цилиндрической заготовки

С использованием известных зависимостей [21] было рассчитано перемещение наружной поверхности тонкостенной оболочки под действием давления закрепления w :

$$w = \frac{pR^2}{Eh} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right), \quad (1)$$

где p – давление со стороны отверстия оболочки; R – радиус наружной поверхности оболочки; h – толщина стенки оболочки; μ – коэффициент Пуассона материала.

С помощью уравнения (1) можно подбирать требуемые перемещения рабочей части оправки и определять реакцию на данное воздействие, т. е. подбирать требуемые геометрические и силовые параметры процесса финишной обработки и тем самым управлять напряженно-деформированным состоянием материала обрабатываемой детали, используя известные механические свойства.

Перемещения рабочей части оправки зависят от режимов процесса наведения эффекта памяти в материале при ее изготовлении. Для моделирования процесса наведения структурных деформаций в силовом элементе в виде трубы из материала с ЭПФ рассмотрим пластическую задачу раздачи трубы.

Для данной задачи известно решение:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{a}{\rho^2} \Delta, \quad (2)$$

где ε_φ – деформация в тангенциальном направлении; a – радиус отверстия трубы; ρ – текущая координата по радиусу сечения трубы; Δ – перемещение стенки отверстия трубы при ее раздаче в радиальном направлении.

С использованием известных зависимостей было получено дифференциальное уравнение в напряжениях:

$$\frac{d}{d\rho} \left(\rho^3 \frac{d\sigma}{d\rho} \right) = \frac{d}{d\rho} (\rho^2 \beta). \quad (3)$$

Решая данное уравнение, получаем выражения:

$$\tilde{\sigma}_\rho = -\lambda \left(1 - \frac{\alpha^2}{\eta^2} \right) + \begin{cases} \ln \frac{\eta}{\alpha}, & \alpha \leq \eta \leq \chi; \\ \ln \frac{\chi}{\alpha} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\chi^2}{\eta^2} \right), & \chi \leq \eta \leq 1; \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma}_p = -\lambda \left(1 + \frac{\alpha^2}{\eta^2} \right) + \begin{cases} \ln \frac{\eta}{\alpha} + 1, \alpha \leq \eta \leq \chi; \\ \ln \frac{\chi}{\alpha} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\chi^2}{\eta^2} \right), \chi \leq \eta \leq 1, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\tilde{\sigma} \leftarrow \frac{1 - \mu^2}{E\beta_0\epsilon_0} \sigma; \quad \alpha = \frac{a}{b}; \quad \chi = \frac{c}{b};$$

$$\lambda = \frac{1}{1 - \alpha} \left[\ln \frac{\chi}{\alpha} + \frac{1 - \chi^2}{2} \right],$$

E — модуль упругости силового элемента; c — граница зон упругой и пластической деформации при раздате; β_0 — коэффициент обратимости деформации; ϵ_0 — предельная обратимая деформация; $\eta = \rho/b$ — текущая координата по радиусу сечения трубы.

В процессе разработки технологического оснастки необходимо рассчитать перемещение базировочной наружной цилиндрической поверхности элемента из материала с памятью формы. Выражение находим как распределение структурных тангенциальных деформаций по сечению втулки при значении координаты по радиусу, равном b :

$$\beta_\phi = \beta_0 \frac{a}{b^2} \Delta, \quad (6)$$

где β_ϕ — тангенциальная компонента структурной деформации; β_0 — соотношение структурной деформации и деформации наведения; a — радиус отверстия трубы; b — радиус наружной поверхности силового элемента; Δ — перемещение стенки отверстия трубы при ее раздате в радиальном направлении.

Разработка инженерной методики проектирования оправки с использованием втулки из материала с ЭПФ

На рис. 4 представлен чертеж оправки для базирования тонкостенной прецизионной цилиндрической заготовки:

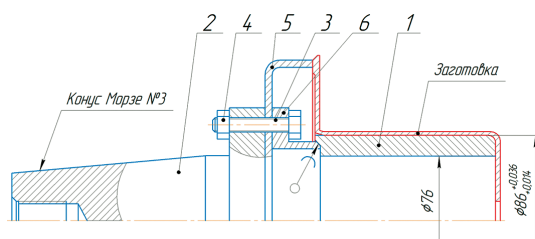


Рис. 4. Чертеж оправки для базирования тонкостенной прецизионной цилиндрической заготовки: 1 — втулка из сплава ТН-1; 2 — хвостовик; 3 — болт; 4 — гайка; 5 — упор; 6 — установочная оправка

дрической заготовки. Базировочным элементом оправки является втулка, изготовленная из сплава ТН-1. Диаметр наружной поверхности втулки 1 согласован с диаметром базовой поверхности обрабатываемой заготовки.

На рис. 5 представлен алгоритм проектирования технологической оснастки с базировочным элементом из сплава с памятью формы.

Производственный эксперимент

Для экспериментальной отработки использовался универсальный круглошлифовальный станок, имеющийся в производственном цехе. По чертежам (рис. 3 и 4) были изготовлены оправка с рабочей частью из сплава ТН-1 и образец-имитатор детали из легированной стали. Шлифование наружного диаметра заготовки проводилось от толщины стен-

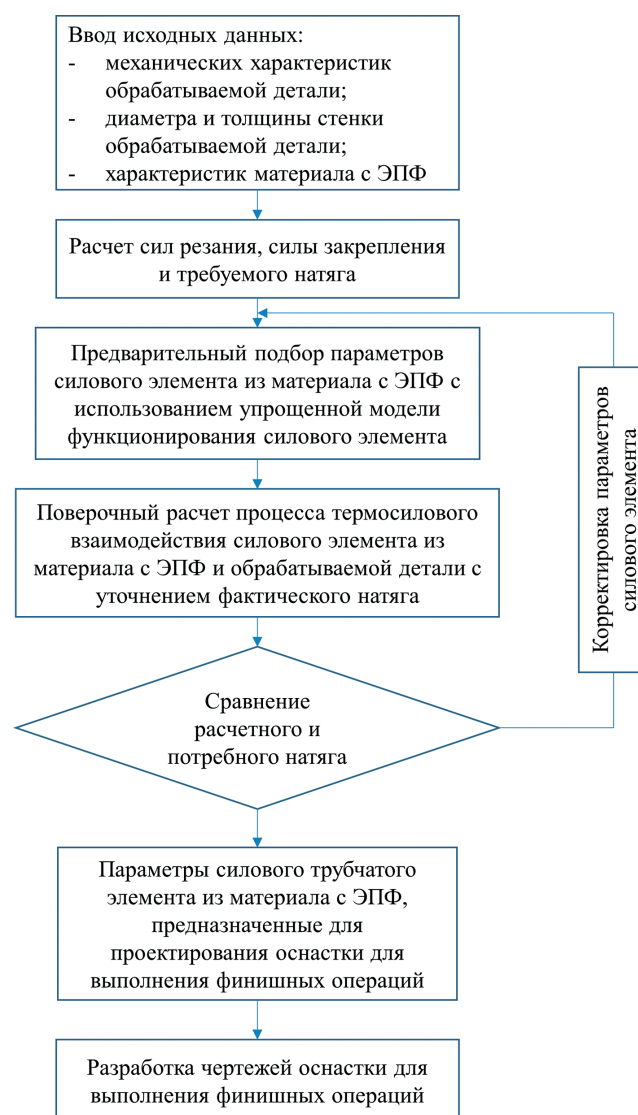


Рис. 5. Алгоритм проектирования технологической оснастки с базировочным элементом из сплава с памятью формы

ки $1-0,05$ мм до размера $0,6 \pm 0,05$ мм. Для нагрева рабочей части оправки применялся технический фен BOSCH GHG 660 LCD, для контроля температуры – бесконтактный инфракрасный термометр Кельвин Компакт 600.

Рассмотрим схему полей допусков наружного диаметра рабочей части оправки и диаметра отверстия заготовки (рис. 6). В начальный момент времени (т. 1 и 1') рабочая часть оправки нагревается до $\theta_T = 150^\circ\text{C}$, ее диаметр уменьшается до $d_{\text{оп } T_{\text{cp}}} \pm T_{\text{доп}}/2$, где $d_{\text{оп } T_{\text{cp}}}$ – средний диаметр оправки при температуре θ_T ; $T_{\text{доп}}$ – величина допуска на диаметр оправки. При этом заготовка находится в условиях температуры цеха ($\theta_N = 22^\circ\text{C}$) и имеет диаметр отверстия $d_{з \text{ cp}} \pm T_{dз}/2$, где $T_{dз}$ – величина допуска на диаметр отверстия заготовки. Посадка осуществляется с зазором $\Delta_{з \text{ cp}}$. Дальнейшее охлаждение приводит к уменьшению зазора и созданию натяга $\Delta_{Н \text{ cp}}$ за счет увеличения диаметра рабочей части оправки до $d_{\text{оп } N_{\text{cp}}} \pm T_{\text{доп}}/2$, где $d_{\text{оп } N_{\text{cp}}}$ – средний диаметр оправки при температуре θ_N , что соответствует т. 2 и 2'. По завершении операции шлифования, для снятия обработанной заготовки с оправки производится их совместный нагрев до $\theta_T = 150^\circ\text{C}$ (т. 3 и 3'), диаметр рабочей части оправки возвращается в первоначальное значение $d_{\text{оп } T_{\text{cp}}} \pm T_{\text{доп}}/2$. Величина гарантированного натяга $\Delta_{Н \text{ min}}$ при максимальном диаметре отверстия заготовки составляет $0,014$ мм. Расчетное давление в соединении «тонкостенная цилиндрическая заготовка – рабочая поверхность силового элемента оправки», необходимое для гарантированного закрепления оправки, составляет $0,42$ МПа.

Выводы

Разработана принципиально новая конструкция технологической оснастки для базирования прецизионных тонкостенных цилиндрических заготовок. Ее отличие от известных оправок заключается в применении зажимающего элемента из материала с эффектом памяти формы. Оснастка способна обеспечить расчетные силы закрепления, не деформируя заготовку и при этом сохраняя стабильность рабочего хода при многократном ее применении.

Таким образом минимизируются геометрические погрешности в виде отклонения от круглости, что повышает эксплуатационные показатели прецизионных деталей. Практическое применение рассматриваемой технологии актуально при разработке операций технологических процессов, в которых важно учитывать деформации заготовок от воздействия технологической оснастки.

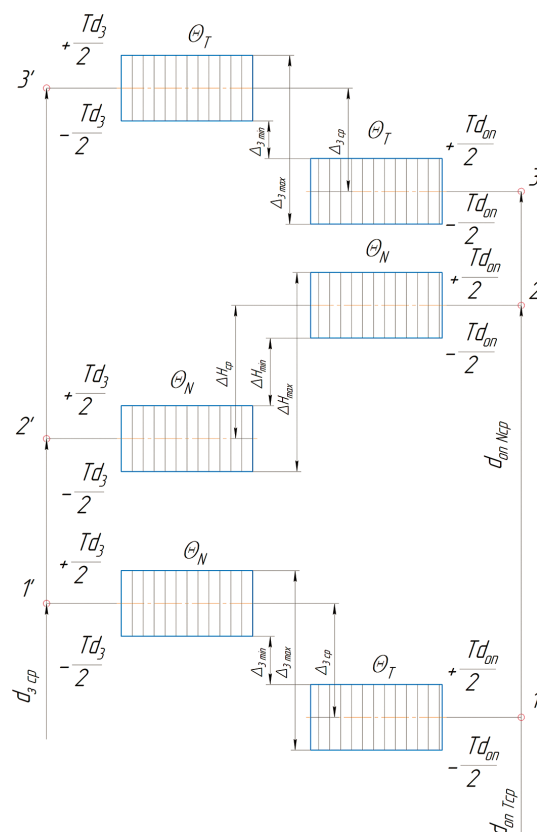


Рис. 6. Схема полей допусков отверстия прецизионной тонкостенной заготовки и оправки с элементом из сплава с памятью формы

Список источников

1. Назаров Д.В., Антипов Д.В., Ломовской О.В. Оценка рисков и потенциальных отказов при проектировании процесса изготовления гибких колес волновых зубчатых передач на основе методики PFMEA // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. № 3(113). С. 26–34. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-26-34 EDN JVAYEM
2. Тимофеев Г.А. Разработка методов расчета и проектирования волновых зубчатых передач для приводов следящих систем. Дис. ... д-ра техн. наук. М., 1997. 358 с.
3. Тимофеев Г.А., Баласанян В. В. Проектирование волновых зубчатых передач с дисковыми и кулачковыми генераторами волн // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 3(768).
4. Васильев М.А., Степанов В.С. Компьютерное моделирование кинематической ошибки волновой передачи с телами качения // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 163–169.
5. Yamamoto M., Iwasaki M., Hirai H., et al. Modeling and compensation for angular transmission error in harmonic drive gearings // EEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2009. Vol. 4. No. 2, pp. 158–165. DOI: 10.1002/tee.20393

6. Patel D.M., Jivani R.G., Pandya V.A. Harmonic Drive Design & Application: A Review // *Global Research and Development Journal for Engineering*. 2015. Vol. 1. No. 1, pp. 34–37.
7. Dhaouadi R., Ghorbel F.H. Modelling and Analysis of Nonlinear Stiffness, Hysteresis and Friction in Harmonic Drive Gear // *International Journal of Modelling and Simulation*. 2008. Vol. 28. No. 3, pp. 329–336. DOI: 10.2316/Journal.205.2008.3.205-4785
8. Полетучий А.И. Теория и конструирование высокоэффективных волновых зубчатых механизмов. Харьков: Изд-во ХАИ, 2005. 675 с.
9. Новиков Е.С., Сильченко П.Н., Тимофеев Г.А. и др. Оценка влияния погрешностей изготовления зубчатых передач на качественные показатели приводов летательных аппаратов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2019. № 1(706). С. 29–36. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-29-36
10. Тимофеев Г.А., Фурсяк Ф.И. Анализ влияния ошибок изготовления деталей волновой зубчатой передачи на ее кинематическую погрешность // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. № 10(679). С. 3–8. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-10-3-8
11. Ломова О.С., Сорокина И.А., Яковлева Е.И. Оптимизация процесса шлифования на основе учета влияния динамических факторов станочной системы // *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16. № 4(49). С. 133–137.
12. Игнатъев А.А., Добряков В.А., Игнатъев С.А. Экспериментально-аналитическая оценка динамического качества станков по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний // *Вестник СГТУ*. 2022. № 2(93). С. 38–52.
13. Носов Н.В., Гришин Р.Г., Ладыгин Р.В. и др. Исследование пористости абразивных инструментов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2021. Т. 23. № 3(101). С. 77–80. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-77-80
14. Бутенко В.И. Критерии выбора эффективных составов абразивных инструментов для обработки поверхностей деталей машин // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. 2021. № 1(72). С. 9–15.
15. Ковалев А.А., Рогов Н.В. Оценка рассеяния значений показателя качества в зависимости от параметров технологического процесса // *Вестник Московского авиационного института*. 2021. Т. 28. № 1. С. 175–186. DOI: 10.34759/vst-2021-1-175-186
16. Бабичев А.П., Тамаркин М.А., Лебедев В.А. и др. Физико-технологические основы методов обработки: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. 410 с.
17. Ломовской О.В., Горяинов Д.С., Назаров Д.В. и др. Компьютерное моделирование процесса функционирования автореверсивной втулки из материала с памятью формы // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018. Т. 20. № 4–3(84). С. 422–426.
18. Барвинок В.А., Богданович В.И., Феоктистов В.С. Физические основы моделирования и проектирования реверсивных силовых приводов из материала с эффектом памяти формы. М.: МЦНТИ, 1997. 72 с.
19. Хасьянов У., Хасьянова Д.У. Оснастка для деформирования муфт термомеханических соединений из сплава с эффектом памяти формы // *Авиационная промышленность*. 2019. № 1. С. 48–51.
20. Назаров Д.В., Ломовской О.В., Плотников А.Н., и др. Автореверсивная втулка из материала с ЭПФ для прецизионного шлифования тонкостенных осесимметричных деталей // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т. 18. № 4–6. С. 1181–1185.
21. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.

References

1. Nazarov DV, Antipov DV, Lomovskoy OV. Assessment of risks and potential failures in the design of the manufacturing process of flexible wave gear wheels based on the PFMEA methodology. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023;(3):26–34. (In Russ.). DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-26-34 EDN JVAYEM
2. Timofeev GA. *Development of methods for calculating and designing wave gears for drives of tracking systems*. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. M.: IMASh RAS; 1997. 358 p. (In Russ.).
3. Timofeev GA, Balasanian VV. Design of wave gear transmissions with disc and cam wave generators. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024(3):29–36. (In Russ.).
4. Vasil'ev MA, Stepanov VS. Wave gear with roller bodies kinematic error computer simulation. *Aerospace MAI Journal*. 2016;23(1):163–169. (In Russ.).
5. Yamamoto M, Iwasaki M, Hirai H, et al. Modeling and compensation for angular transmission error in harmonic drive gearings. *EEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2009;4(2):158–165. DOI: 10.1002/tee.20393
6. Patel DM, Jivani RG, Pandya VA. Harmonic Drive Design & Application: A Review. *Global Research and Development Journal for Engineering*. 2015;1(1):34–37.
7. Dhaouadi R, Ghorbel FH. Modelling and Analysis of Nonlinear Stiffness, Hysteresis and Friction in Harmonic Drive Gear. *International Journal of Modelling and Simulation*. 2008;28(3):329–336. DOI: 10.2316/Journal.205.2008.3.205-4785
8. Poletuchy AI. *Theory and design of highly efficient wave gear mechanisms*. Kharkiv: KhAI; 2005. 675 p. (In Russ.).
9. Novikov ES, Silchenko PN, Timofeev GA, et al. Evaluation of the Influence of Manufacturing Faults in Gears on the Quality Indicators of Aircraft Actuators. *BMSTU Journal*

- I of Mechanical Engineering*. 2019(1):29-36. (In Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-29-36
10. Timofeev GA, Fursyak FI. The Estimation of the Influence of Manufacturing Faults in a Harmonic Drive on the Kinematic Error. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2016(10):3-8. (In Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2016-10-3-8
 11. Lomova OS, Sorokina IA, Yakovleva EI. Optimization of the grinding process based on consideration of the influence of dynamic factors of the machine system. *Vestnik UGATU*. 2012;16(4):133-137. (In Russ.).
 12. Ignatiev AA, Dobryakov VA, Ignatiev SA. Experimental and analytical evaluation of dynamic quality of machine tools using stochastic characteristics of acoustically-induced vibrations. *Vestnik SGTU*. 2022(2):38-52. (In Russ.).
 13. Nosov NV, Grishin RG, Ladyagin RV, et al. Research porosity of abrasive tools. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021;23(3):77-80. (In Russ.). DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-77-80
 14. Butenko VI. Criteria for the effective compositions abrasive tools selection for processing surfaces of machine parts. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*. 2021(1):9-15. (In Russ.).
 15. Kovalev AA, Rogov NV. Evaluation of quality indicator dispersion depending on technological process parameters. *Aerospace MAI Journal*. 2021;28(1):175-186. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2021-1-175-186
 16. Babichev AP, Tamarkin MA, Lebedev VA, et al. *Physical and technological bases of processing methods*. Rostov-na-Donu: Feniks; 2006. 410 p. (In Russ.).
 17. Lomovskoy OV, Goryainov DS, Nazarov DV, et al. Computer modeling of the process of functioning of sleeve made of a material with a shape memory effect. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;20(4-3): 422-426. (In Russ.).
 18. Barvinok VA, Bogdanovich VI, Feoktistov VS. *Physical foundations of modeling and designing reversible power drives made of shape memory material*. Moscow: MTsNTI; 1997. 72 p. (In Russ.).
 19. Khasyanov U, Khasyanova DU. The tooling for coupling deformation of thermomechanical connections from alloy with shape memory effect. *Aviatsionnaya promyshlennost'*. 2019(1):48-51. (In Russ.).
 20. Nazarov DV, Lomovsky OV, Plotnikov AN, et al. Autoreversing sleeve from a sma for precision grinding of thin-walled axisymmetric parts. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(4-6):1181-1185. (In Russ.).
 21. Pisarenko GS, Yakovlev AP, Matveev VV. *Handbook of boiler resistance materials*. 2nd ed. Kiev: Naukova dumka; 1988. 736 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 23.04.2025
 Одобрена после рецензирования / Revised 12.05.2025
 Принята к публикации / Accepted 14.05.2025