

УДК 621.923.5

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ХОНИНГОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ

В. А. Огородов

ogorodov.v@ugatu.su

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 02.09.2020

Аннотация. Выполнены исследования деформации закрепленного в зажимном приспособлении тонкостенного цилиндра при хонинговании его отверстия под действием системы радиальных сил, имитирующих разжим брусков в среде конечно-элементного моделирования DEFORM-3D V6.1. Произведен анализ различных способов закрепления и определены условия, обеспечивающие повышение точности хонингования тонкостенных цилиндров.

Ключевые слова: хонингование; отверстие; точность; тонкостенный цилиндр; способ закрепления; деформация; радиальные силы; программный комплекс DEFORM-3D V6.1.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью цилиндров гидравлических систем летательных аппаратов является малая толщина их стенок [1]. При этом от точности изготовления отверстий гидроцилиндров зависит их надежность и долговечность [1] и, как следствие, безотказность работы самой гидравлической системы. В связи с этим обеспечение точности изготовления тонкостенных цилиндров на операции финишной обработки, которой в основном является хонингование, остается актуальной проблемой производства летательных аппаратов [1, 2].

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Вопросам обеспечения высокой точности отверстий тонкостенных цилиндров посвящено большое число исследований в области хонингования [1–10]. Исследованиями [3, 4] показано, что распределение радиальных сил резания, действующих в контакте брусков с обрабатываемой поверхностью, в первую очередь определяется отклонением формы обрабатываемого отверстия.

В работах [5–7] установлена связь деформации тонкостенного цилиндра при закреплении в зажимном приспособлении

с формируемым отклонением формы обработанного отверстия. В исследованиях [4, 8] выявлено, что при разжиге хонинговальных брусков происходит упругое отжатие стенок цилиндра, приводящее к неравномерности распределения радиальных сил резания, которая снижает эффективность исправления исходного отклонения формы отверстия. По этой причине для обеспечения требуемой точности формы отверстий тонкостенных цилиндров при хонинговании рекомендуется уменьшать усилие разжима брусков [9], что увеличивает продолжительность обработки.

В связи с этим при хонинговании тонкостенных цилиндров для обеспечения высокой точности обработки нужно обеспечить такое распределение сил резания, которое зависит только от отклонения формы обрабатываемого отверстия, как при хонинговании жестких деталей – при отсутствии погрешности формы распределение должно быть равномерным [3].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика состояла в исследовании деформации типового образца от действия системы радиальных сил при различных спо-

собах его закрепления как основного фактора, обеспечивающего точность хонингования тонкостенного цилиндра. Наилучшим должен быть способ с наиболее равномерной деформацией образца от действия одинаковых по величине радиальных сил.

В качестве типового образца был принят тонкостенный цилиндр с диаметром отверстия 35 мм, толщиной стенки 1,5 мм и длиной 75 мм. Отношение толщины стенки образца к радиусу срединной поверхности, его длины к диаметру отверстия соответствуют типовым относительным размерам реальных гидроцилиндров летательных аппаратов. Материал образца – алюминиевый сплав Д16Т (модуль упругости Юнга равен 68,9 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,33).

Исследованию подвергались получившие в практике хонингования наибольшее применение следующие способы закрепления тонкостенных цилиндров: по наружной поверхности эластичной диафрагмой, по торцам сжимающим усилием и закрепление за фланец.

Помимо указанных, были исследованы еще два известных, но редко применяемых способа закрепления тонкостенного цилиндра: растягивающим осевым усилием [8], а также зажим цилиндра по наружной поверхности эластичной диафрагмой с одновременным сжатием по торцам [8, 10].

Растягивающее осевое усилие при закреплении цилиндра создается наворачиванием на его наружную резьбу, которая имеется практически у всех гидроцилиндров летательных аппаратов, гайки, опирающейся на корпус зажимного приспособления.

При закреплении цилиндра по наружной поверхности эластичной диафрагмой с одновременным приложением осевого сжимающего усилия (далее – совмещенном методе закрепления) выполнялось условие [10]

$$p = \mu \frac{T}{2\pi R^2},$$

где p – давление обжима цилиндра по наружной поверхности; μ – коэффициент Пуассона; T – осевое сжимающее усилие; R – радиус срединной поверхности цилиндра.

Выполнение требования (1) обеспечивает равенство нулю вектора внешней нагрузки [4], приложенной к цилиндру, поэтому должно исключить его деформацию при закреплении. Коэффициент трения на торцовых поверхностях образца принят равным 0,4 (для алюминия).

Напряженно-деформированное состояние образца моделировалось в среде DEFORM-3D Ver. 6.1 (sp 2). Типовой образец был разбит на 4074 узла и 14 036 конечных элементов. Это минимальная частота сетки, при которой не менее трех узлов расположено на одной линейной, образующей отверстия.

К поверхности отверстия цилиндра прикладывались 12 равных по величине сосредоточенных сил, которые имитируют действие радиальных сил резания при разжиге 4 брусков хонинговальной головки, по 3 для каждого бруска (рис. 1).

Координаты узлов сетки, в которых прикладывались силы, приведены в табл. 1.

Расстояние между точками приложения сил выбрано таким, чтобы исключить взаимное влияние деформаций от действия соседних сил. Бруски расположены посередине отверстия. Длина хонинговальных брусков равна 50 мм, что составляет рекомендуемые 0,75 от длины цилиндра [9].

Величина радиальных сил при исследованиях выбиралась из условия обеспечения радиальному перемещению бруска на несколько мкм, что соответствует радиальной подаче брусков на операции хонингования при устранении исходного отклонения формы отверстия [9], и принималась равной 150 Н, 100 Н, 50 Н, 37 Н и 25 Н.

Давление p принято равным 0,4 МПа, что соответствует давлению воздуха в цеховой пневмосети машиностроительных предприятий. Величина осевого усилия T принята, исходя из условия (1), равной 2537 Н. При исследовании комбинированного способа закрепления расчет деформации был выполнен при следующих усилиях: $p = 0,4$ МПа, $T = 2537$ Н; $p = 0,2$ МПа, $T = 1268,5$ Н; $p = 0,1$ МПа и $T = 634,25$ Н.

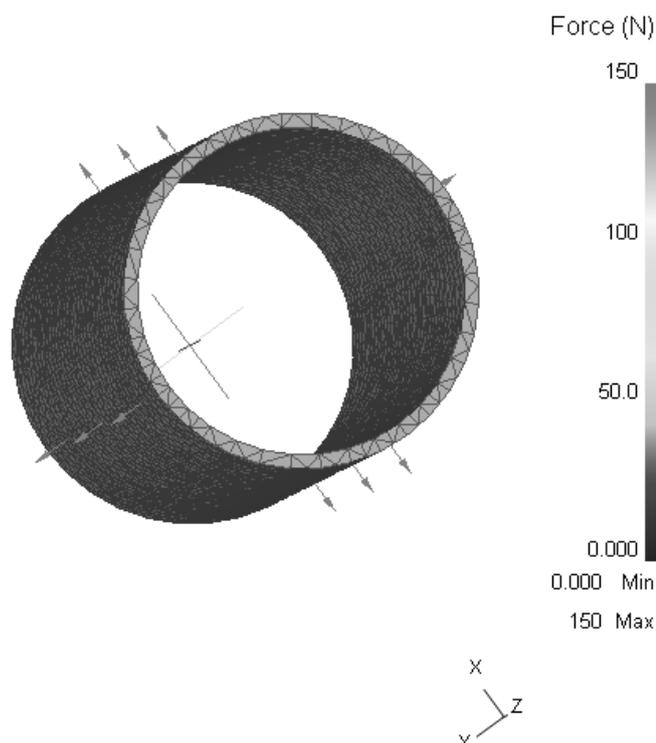


Рис. 1. Система радиальных сил, действующих на типовой образец

Таблица 1

Координаты точек приложения радиальных сил

№ n/n	Направление силы	Координаты узла		
		X	Y	Z
1.	+X	1.7497999191E+001	2.3202400655E-002	1.1688899994E+001
2.	+X	1.7500000000E+001	0.0000000000E+000	3.7500000000E+001
3.	+X	1.7497999191E+001	-2.3202400655E-002	6.3311100006E+001
4.	-X	-1.7497999191E+001	-2.3202400655E-002	1.1688899994E+001
5.	-X	-1.7500000000E+001	0.0000000000E+000	3.7500000000E+001
6.	-X	-1.7497999191E+001	2.3202400655E-002	6.3311100006E+001
7.	+Y	-2.3202400655E-002	1.7497999191E+001	1.1688899994E+001
8.	+Y	0.0000000000E+000	1.7500000000E+001	3.7500000000E+001
9.	+Y	2.3202400655E-002	1.7497999191E+001	6.3311100006E+001
10.	-Y	2.3202400655E-002	-1.7497999191E+001	1.1688899994E+001
11.	-Y	0.0000000000E+000	-1.7500000000E+001	3.7500000000E+001
12.	-Y	-2.3202400655E-002	-1.7497999191E+001	6.3311100006E+001

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

При моделировании напряженно-деформированного состояния тонкостенного цилиндра при хонинговании сначала определялась его радиальная деформация при закреплении (рис. 2).

На рис. 2 видно, что крепление тонкостенного цилиндра за фланец, как и предполагалось, не вызывает его деформации (кривая 1). Наиболее равномерная деформация тонкостенного цилиндра от действия зажимного усилия достигается при закреплении по

наружной поверхности (кривая 2) или растягивающим осевым усилием (кривая 4). При этом для обоих способов в результате деформации тонкостенного цилиндра размер обрабатываемого отверстия уменьшается (отрицательный знак деформации).

Наибольшая деформация при закреплении тонкостенного цилиндра происходит при зажиме его по торцам (кривая 3). При этом в результате деформации отверстие увеличивается на 3 мкм, что необходимо учитывать при контроле его размера в процессе хонингования.

Комбинированный метод закрепления цилиндра при выполнении соотношения (1), как видно на рис. 2 (кривая 5), обеспечивает нулевую деформацию заготовки только в ее средней части. Однако у краев цилиндра от действия зажимной плиты возникают моменты сил на торцах цилиндра, вызывающие дополнительные напряжения (рис. 3) и, как следствие, деформацию цилиндра в сторону уменьшения размера отверстия.

Поскольку двойное приложение зажимных сил при комбинированном способе, очевидно, является избыточным, было про-

ведено исследование деформации образца при меньших значениях усилий закрепления p и T , но при обязательном соблюдении условия (1), а именно: $p = 0,2$ МПа и $T = 1268,5$ Н; $p = 0,1$ МПа и $T = 634,25$ Н.

Однако уменьшение величины зажимных усилий при применении этого способа, как показывает анализ результатов расчетов, представленных на рис. 4, хотя и вызывает ожидаемо меньшую деформацию образца, но не позволяет исключить ее неравномерность, т. к. не устраняются причины ее образования.

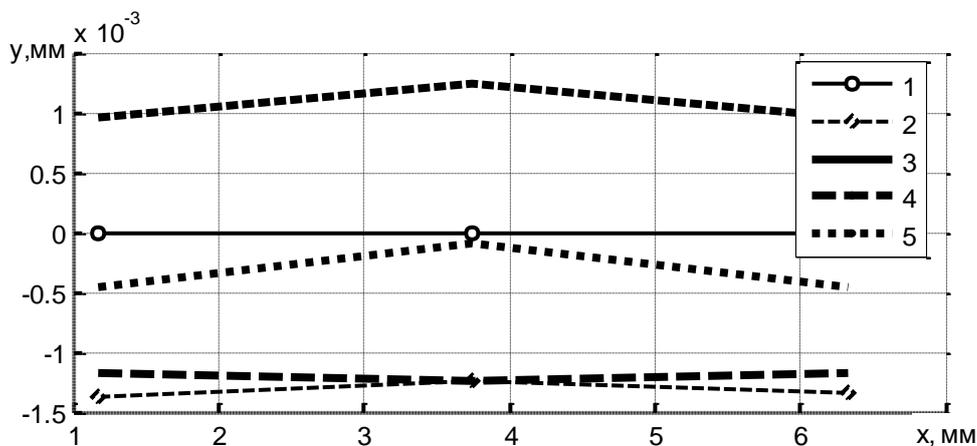


Рис. 2. Радиальная деформация типового образца при различных способах закрепления: 1 – за фланец; 2 – по наружной поверхности; 3 – осевым сжимающим усилием; 4 – растягивающим осевым усилием; 5 – комбинированный способ

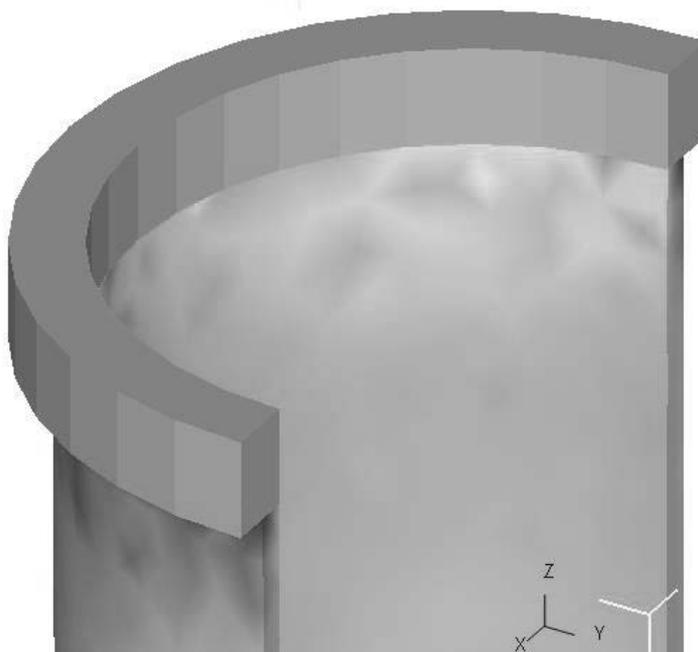


Рис. 3. Напряжения у торца типового образца при закреплении комбинированным способом

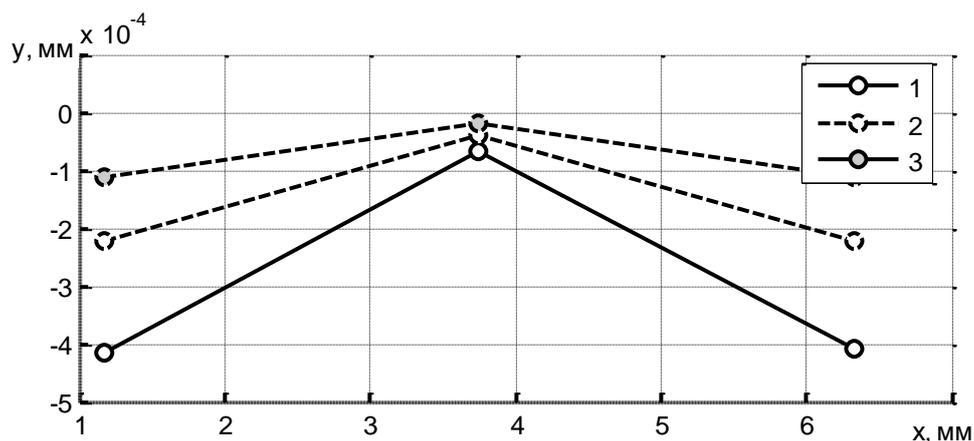


Рис. 4. Радиальная деформация типового образца при комбинированном способе закрепления: 1 – $p = 0,4$ МПа и $T = 2537$ Н; 2 – $p = 0,2$ МПа и $T = 1268,5$ Н; 3 – $p = 0,1$ МПа и $T = 634,25$ Н

При изучении деформации образца в окружном направлении при различных способах его закрепления было установлено (рис. 5), что практически все исследуемые способы обеспечивают равномерную деформацию тонкостенного цилиндра, кроме зажима по наружной поверхности (кривая 2), при этом наибольшая неравномерность наблюдается у обоих торцов образца. Последнее можно объяснить влиянием граничных условий на результаты расчетов, а также заданной точностью расчетов в DEFORM-3D. Подтверждением этого может служить то, что неравномерность деформации (в меньшей степени) наблюдается при закреплении образца комбинированным способом (кривая 5).

Однако по своей величине окружная неравномерность на порядок меньше неравномерности деформации в ее продольном направлении. Поэтому наибольший интерес с точки зрения обеспечения точности обработки отверстия тонкостенного цилиндра при хонинговании представляет его деформация в продольном направлении.

При воздействии радиальных сил на образец его напряженно-деформированное состояние изменяется. На рис. 6 показан трекинг трех точек P1, P2 и P3 приложения радиальных сил величиной 100 Н в направлении +X образца, закрепленного по торцам сжимающим усилием. В результате действия радиальных сил деформация образца в этих точках увеличилась до 5,45 мкм.

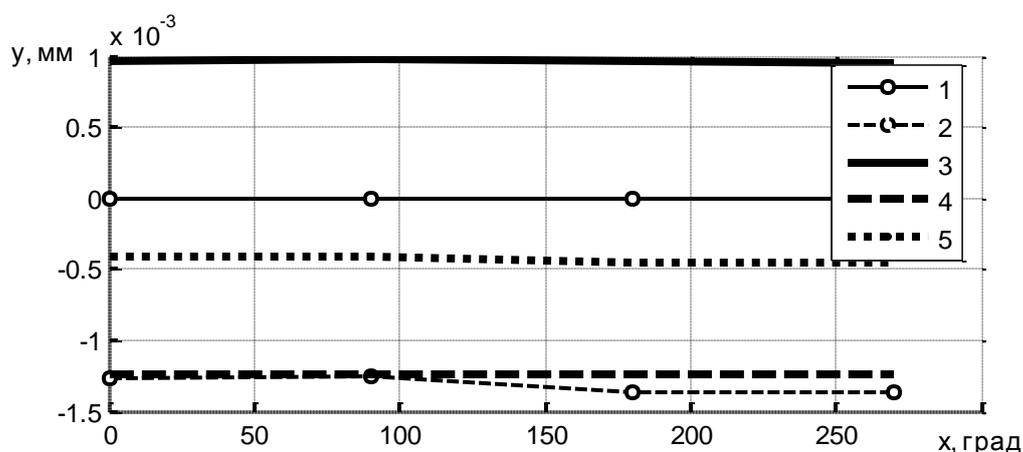


Рис. 5. Радиальная деформация типового образца в окружном направлении при различных способах закрепления: 1 – за фланец; 2 – по наружной поверхности; 3 – осевым сжимающим усилием; 4 – растягивающим осевым усилием; 5 – комбинированным способом

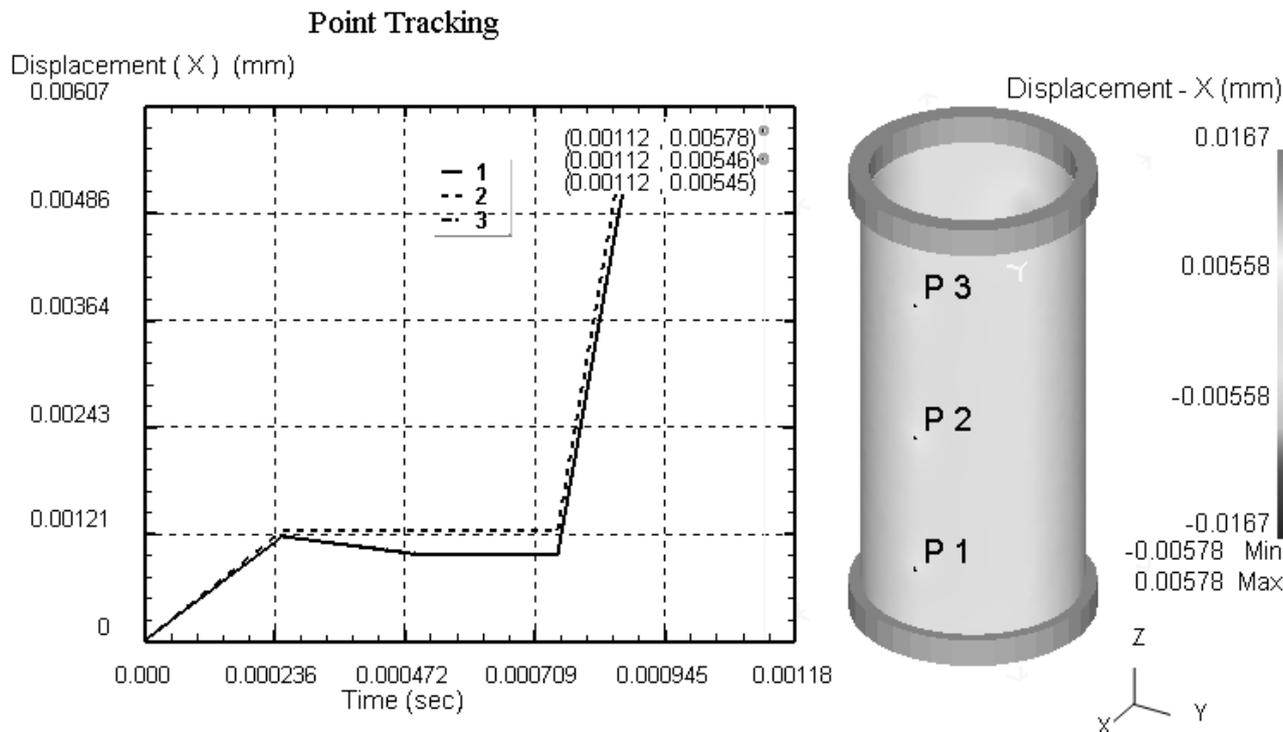


Рис. 6. Трекинг деформации образца от действия сосредоточенных сил при зажиме по торцам

Характер деформации тонкостенного цилиндра от действия радиальных сил для изучаемых способов закрепления показан на рис. 7. Из этого следует, что даже закрепление тонкостенного цилиндра за фланец не предотвращает неравномерность деформации (кривая 1) от действия радиальных сил: со стороны свободного края цилиндра наблюдается увеличение деформации образца.

Из приведенных на рис. 7 результатов расчетов также следует, что, исходя из условия непрерывности контакта хонинговального бруска с образцом, для обеспечения его равномерной деформации в точках P1, P2 и P3 при всех способах закрепления тонкостенных цилиндров должны действовать разные по величине радиальные силы.

При этом на рис. 7 видно, что наиболее равномерная деформация от действия радиальных сил резания имеет место только для

способов, уменьшающих диаметр обрабатываемого отверстия при закреплении, а именно: по наружной поверхности тонкостенного цилиндра эластичной диафрагмой (кривая 2) или растягивающим осевым усилием (кривая 4).

Следовательно, указанные способы закрепления тонкостенного цилиндра можно рассматривать как способы повышения его жесткости, что необходимо для обеспечения точности обработки отверстий тонкостенных цилиндров при хонинговании.

Исследование зависимости деформации типового образца от величины зажимных усилий при комбинированном способе закрепления (рис. 8) показало, что уменьшение усилий закрепления приводит к выравниванию деформации типового образца (кривая 3) от действия радиальных сил, хотя при этом ее величина возрастает.

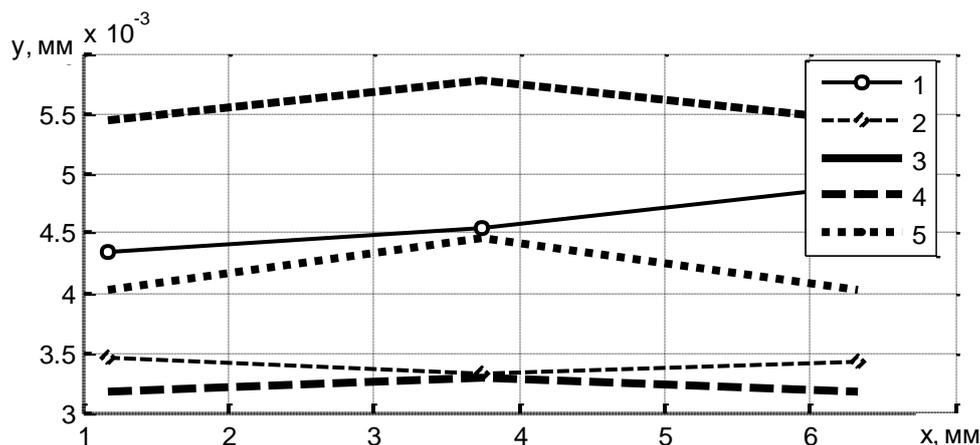


Рис. 7. Деформация типового образца под действием радиальных сил:
 1 – за фланец; 2 – по наружной поверхности; 3 – осевым сжимающим усилием;
 4 – растягивающим осевым усилием; 5 – комбинированным способом

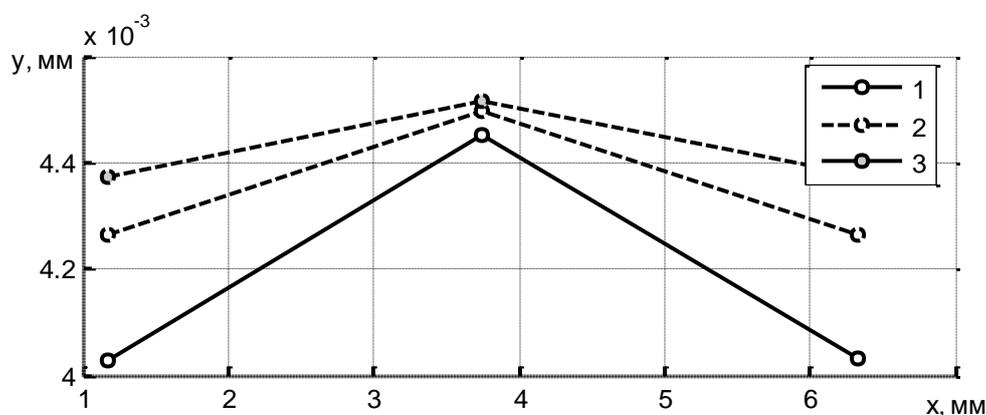


Рис. 8. Радиальная деформация типового образца при комбинированном способе закрепления от действия радиальных сил величиной 100 Н:
 1 – $p = 0,4$ МПа, $T = 2537$ Н; 2 – $p = 0,2$ МПа, $T = 1268,5$ Н; 3 – $p = 0,1$ МПа, $T = 634,25$ Н

Такое выравнивание деформации можно объяснить уменьшением моментов сил на торцах образца из-за меньшей величины осевого сжимающего усилия. Важно, что при этом надежность закрепления образца не снижается. Поэтому данный способ закрепления тонкостенных цилиндров целесообразно применять при меньших зажимных усилиях, поскольку при этом надежность закрепления образца сохраняется.

При сравнении деформации от действия радиальных сил при зажиме типового образца (по наружной поверхности, закреплением растягивающим усилием и комбинированным способом) при уменьшенных зажимных усилиях (рис. 9) выявлено, что все эти три способа приводят к примерно одинаковой по величине неравномерности деформации.

Основное их отличие состоит в характере требуемого для получения равномерной деформации распределения радиальных сил. При зажиме растягивающим усилием или комбинированным способом требуется уменьшить радиальную силу в средней точке, а при зажиме по наружной поверхности наоборот – увеличить.

Поэтому с точки зрения обеспечения высокой точности геометрической формы отверстия и с учетом распределения суммарной эпюры радиальных сил резания вдоль обрабатываемой поверхности предпочтительными способами закрепления тонкостенных цилиндров на операции хонингования являются зажим растягивающим усилием или зажим цилиндра по наружной поверхности эластичной диафрагмой с одновременным сжатием осевым усилием.

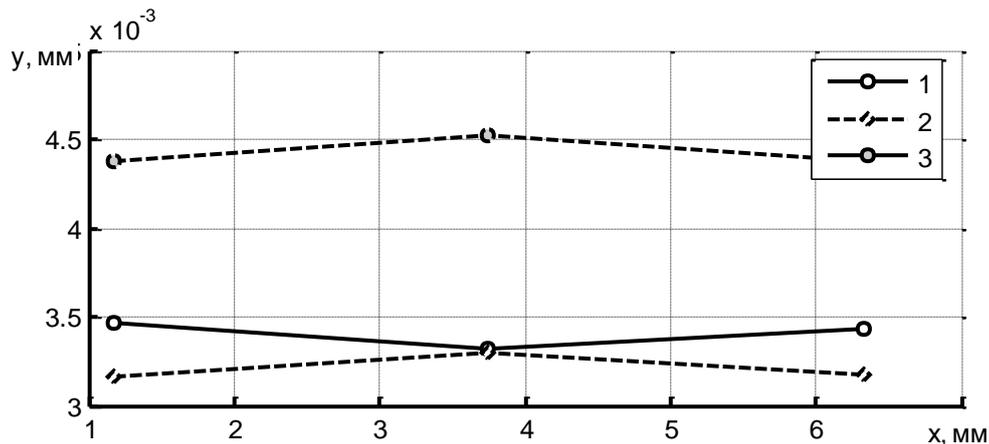


Рис. 9. Сравнение радиальной деформации типового образца при различных способах закрепления:
 1 – по наружной поверхности; 2 – растягивающим осевым усилием;
 3 – комбинированным способом ($p = 0,1$ МПа и $T = 634,25$ Н)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что оценка способа закрепления тонкостенного цилиндра на операции хонингования по его деформации от действия зажимного усилия не является достаточной.

2. Наиболее объективной оценкой способа закрепления тонкостенных цилиндров является изучение равномерности распределения радиальных сил резания, действующих в контакте хонинговальных брусков с обрабатываемой поверхностью при отсутствии исходного отклонения формы.

3. Показано, что при отсутствии исходного отклонения формы обрабатываемого отверстия в тонкостенном цилиндре распределение сил резания должно быть равномерным, как для жестких деталей.

4. Установлено, что наилучшими способами закрепления тонкостенных цилиндров на операции хонингования являются те, при которых в результате приложения зажимного усилия размер отверстия уменьшается.

5. При закреплении тонкостенного цилиндра на операции хонингования по наружной поверхности эластичной диафрагмой с одновременным его сжатием по торцам для обеспечения точности обработки необходимо уменьшать оба усилия закрепления, выдерживая принятое соотношение между ними.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огородов В. А. Исследование средств технологического обеспечения долговечности тонкостенных цилиндров при хонинговании // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева.

2015. Т. 71, № 2. С. 48–54. [V. A. Ogorodov, “Research of means of technological support for the length of thin-walled cylinders during honing”, (in Russian), in *Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva*, vol. 71, no. 2, pp. 48-54, 2015.]

2. Кудояров Р. Г. Особенности алмазного хонингования при изготовлении точных отверстий деталей авиационных агрегатов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2002. № 2. С. 49–51. [R. G. Kudoyarov, “Features of diamond honing in the manufacture of precise holes of parts of aircraft units”, (in Russian), in *Izvestiya vy'sshih uchebny'h zavedenij. Aviacionnaya tehnika*, no. 2, pp. 49-51, 2002.]

3. Огородов В. А. Simulation of honing // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31, no. 3. Pp. 292–295. [V. A. Ogorodov, “Simulation of honing”, in *Russian Engineering Research*, vol. 31, no. 3, pp. 292-295, 2011.]

4. Огородов В. А. Расчет радиальных сил резания при хонинговании тонкостенных цилиндров // Металлообработка. 2018. № 2 (104). С. 28–33. [V. A. Ogorodov, “Calculation of radial cutting forces for honing thin-wall cylinders”, (in Russian), in *Metalloobrabotka*, no. 2 (104), pp. 28-33, 2018.]

5. Лысенко Н. К., Шилова Ю. А. Технологическое обеспечение хонингования отверстий цилиндров малой жесткости // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4 (3). С. 1104–1105. [N. K. Lysenko, Yu. A. Shilova, “Technological support for honing holes of low-rigidity cylinders”, (in Russian), in *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, vol. 13, no. 4 (3), pp. 1104-1105, 2011.]

6. Огородов В. А. Hole Shaping in the Honing of Thin-Walled Cylinders // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, no. 6. Pp. 549–553. [V. A. Ogorodov, “Hole Shaping in the Honing of Thin-Walled Cylinders”, in *Russian Engineering Research*, vol. 37, no. 6, pp. 549-553, 2017.]

7. Огородов В. А. Deliberate Deformation of a Thin-Walled Cylinder on Clamping // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, no. 12. Pp. 1023–1027. [V. A. Ogorodov, “Deliberate Deformation of a Thin-Walled Cylinder on Clamping”, in *Russian Engineering Research*, vol. 37, no. 12, pp. 1023-1027, 2017.]

8. Огородов В. А. Анализ способов закрепления тонкостенных цилиндров на операции хонингования // Металлообработка. 2019. № 1 (109). С. 22–29. [V. A. Ogorodov,

“Analysis of methods for fixing thin-walled cylinders in honing operations”, (in Russian), in *Metalloobrabotka*, no. 1 (109), pp. 22-29, 2019.]

9. **Хонингование:** справочное пособие / С. И. Куликов [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 168 с. [S. I. Kulikov, et al., *Honing. Reference book*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1973.]

10. **Огородов В. А.** Патент № 1234057. Способ закрепления тонкостенных цилиндров. Опубл. 30.05.1986. Бюл. № 20. [V. A. Ogorodov, “*Method for fixing thin-walled cylinders*”, Patent 1234057, 1986.]

ОБ АВТОРЕ

ОГОРОДОВ Владимир Алексеевич, доц. каф. автоматизации технол. процессов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1975). Канд. техн. наук по технол. произв. ЛА (КАИ, 1985). Иссл. в обл. хонингования.

METADATA

Title: Ensuring the accuracy of honing of thin-walled cylinder.

Authors: V. A. Ogorodov

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ogorodov.v@ugatu.su

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 3 (89), pp. 27-35, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Investigations of the deformation of a thin-walled cylinder fixed in a clamping device during honing of its hole under the action of a system of radial forces simulating the unclamping of bars in the DEFORM-3D V6.1 finite element modeling environment have been carried out. The analysis of various methods of fastening was carried out and the conditions were determined that ensure an increase in the accuracy of the honing of thin-walled cylinders.

Key words: honing; hole; precision; thin-walled cylinder; fixing method; deformation; radial forces; DEFORM-3D V6.1 software package.

About authors:

OGORODOV, Vladimir Alekseevich, Prof., Dept. of Aviation Technology. Dipl. engineer-mechanic (UAI, 1975). Cand. of Tech. Sci. (KAI, 1985).