

## СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКРІПЛЕННЯ ТОНКОСТІННОГО КІЛЬЦЯ В ТРИКУЛАЧКОВОМУ ПАТРОНІ

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Проаналізовано конструкції токарних патронів та встановлено основні напрямки для їх оптимізаційного проектування. Подано вирази для визначення пружних деформацій тонкостінного кільця при закріпленні його в трикулачковому патроні залежно від виду закріплення (в стиск, або в розтиск). Розміри опорної поверхні кулачків патрона оптимізовано за критерієм мінімального відхилення від круглості отвору закріпленого в ньому циліндричного кільця. Оптимізацію виконано у два етапи. Перший етап передбачає оптимізацію ширини опорної поверхні, а другий — оптимізацію її діаметра. Досліджуючи поведінку скінченно-елементної моделі для широкого діапазону навантажень і розміри кільця, зокрема їхньої кривизни (відношення товщини поперечного перерізу кільця до його середнього радіуса) в межах  $1/5 \dots 1/20$ , виявлено, що відхилення від круглості отвору закріпленого в патроні кільця: збільшується лінійно зі збільшенням навантаження на кулачок, а також обернено пропорційно їхній кривині в третьому степені (для кільця малої кривини); зменшується зі збільшенням ширини кулачка. При цьому для відношення діаметрів опорної поверхні кулачка до базової (зовнішньої) поверхні кільця: меншого від одиниці досягаються максимальні похибки; близького до одиниці похибка зменшується; більшого від одиниці практично не змінюється. Показано графічні залежності відхилення від круглості отвору сталевого кільця, від ширини опорної поверхні кулачка та відношення діаметрів кулачка і кільця в контакті. Дослідженням деформації побудованої скінченно-елементної моделі технологічної системи «кільце-кулачки трикулачкового самоцентрувального патрона» визначені оптимальні параметри опорної поверхні кулачків за критерієм найменшого відхилення від круглості отвору кільця. Верифікація скінченно-елементної моделі виконана за допомогою порівняння результатів чисельного аналізу з обчисленими величинами деформації кільця та відхилення від круглості його отвору при закріпленні в патроні з вузькими кулачками підтвердила її адекватність і точність. Розбіжність результатів за обома методами склала менше 2,5 %, що цілком достатньо для інженерного прогнозування.

**Ключові слова:** трикулачковий патрон, тонкостінне самоцентрувальне кільце, сила закріплення, відхилення від круглості, радіальна деформація, скінченно-елементне моделювання.

### Постановка задачі

Деталі, що мають форму тонкостінних кілець, широко використовуються в механізмах і машинах. Часто до них ставляться високі вимоги до точності форми циліндричних поверхонь, які досить складно забезпечити обробленням на токарних верстатах через радіальну деформацію заготовок таких деталей під дією сил закріплення.

Кулачкові патрони широко використовують для закріплення заготовок насамперед на токарних та шліфувальних верстатах. Якщо заготовки нежорсткі в радіальному напрямку, наприклад тонкостінні кільця чи втулки, то їх закріплення в кулачкових патронах можуть супроводжуватися значною пружною деформацією і втратою точності форми оброблюваної поверхні. Деформація заготовки залежить від її жорсткості, зусилля та схеми її закріплення, числа кулачків і розмірів їх опорних поверхонь. Так, чим більше число кулачків і чим більше форма їх опорних поверхонь відповідає формі, що прилягає до технологічної бази заготовки, тим менша деформація заготовки і тим

менша похибка її форми. Розробка і дослідження показників точності такого оснащення є актуальною науково-технічною задачею.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

В умовах серійного та одиничного виробництва заготовки кільцевих деталей найчастіше закріплюють в універсальних самоцентрувальних трикулачкових патронах, у яких для зменшення похибок форми отвору кільця кулачки патрона мають збільшену поверхню контакту з оброблюваною заготовкою. Деформування таких кілець з огляду на практичну потребу вивчалось в різний час багатьма дослідниками [1]—[3]. Однак через невизначеність фактичного контакту «кільце — кулачок патрона» та складний характер деформування кільця в контакт з опорними поверхнями кулачків аналіз його напружено-деформованого стану (НДС) засобами лінійної теорії пружності можливий лише для випадків з вузькими кулачками [1], [2]. Продуктивним для вирішення проблеми виявились чисельні методи аналізу НДС [3]. Проте на сьогодні питання обґрунтування раціональної геометрії опорних поверхонь кулачків залишається відкритим.

Метою дослідження є оптимізація параметрів опорної поверхні кулачків самоцентрувального трикулачкового патрона шляхом створення і дослідження параметричної скінченно-елементної (СЕ) моделі закріплення циліндричних кілець для зменшення похибок форми їхніх отворів під час механічного оброблення.

### Виклад основного матеріалу

За результатами аналізу конструкцій токарних патронів та їхніх характеристик встановлено такі основні напрямки оптимізаційного проектування:

- збільшення кута охоплення одним затискним елементом об'єкта закріплення;
- збільшення кількості затискних елементів.

Під час такого проектування потрібно дотримуватися умов забезпечення:

- мінімально допустимого значення деформації оброблюваної заготовки;
- необхідного зусилля затиску і його регулювання;
- достатньої жорсткості затиску тощо.

У випадку дії сили закріплення, яка розвивається кулачками патрона на закріплюване по зовнішній поверхні кільце, воно прогинається до центра в зоні дії на нього кожного кулачка і вигинається від центру в зоні між кулачками (рис. 1а). У разі закріплення кільця в кулачковому патроні в розтиск, тобто по внутрішній поверхні, напрям деформації у вказаних вище зонах кільця протилежний (рис. 1б).

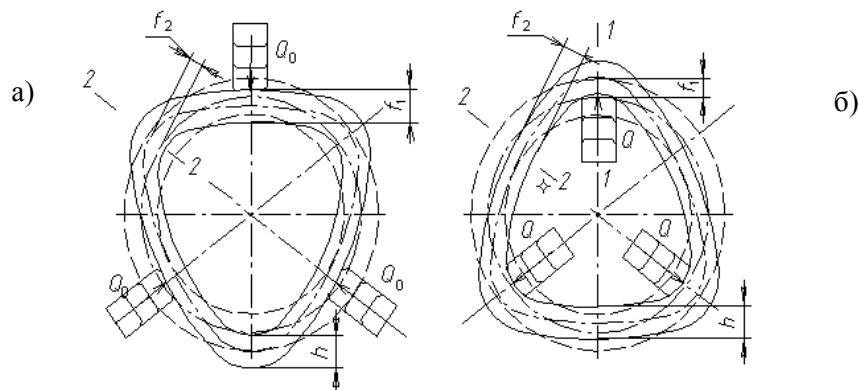


Рис. 1. Схема деформації тонкостінного кільця

Розрахунок пружних деформацій тонкостінного кільця у разі закріплення його в трикулачковому самоцентрувальному патроні з вузькими кулачками — залежно від виду закріплення (в стиск, або в розтиск) — здійснюється за такими залежностями [5]:

- закріплення по зовнішній поверхні

$$f_1 = 0,016 \frac{Q_0 R^3}{EI}; \quad (1)$$

$$f_2 = -0,014 \frac{Q_0 R^3}{EI}; \quad (2)$$

– закріплення по внутрішній поверхні

$$f_1 = 0,0159 \frac{Q_0 R^3}{EI}; \quad (3)$$

$$f_2 = -0,0143 \frac{Q_0 R^3}{EI}, \quad (4)$$

де  $Q_0$  — сила закріплення на кулачку, Н;  $R$  — середній радіус кільця (рис. 1),  $R = \frac{d-h}{2}$ , мм;

$E$  — модуль пружності матеріалу;  $I = \frac{\pi(d^4 - D^4)}{64}$ , мм<sup>4</sup> — момент інерції радіального поперечного

перерізу кільця.

Знак мінус у формулах для перерізу 2—2 означає, що радіальний напрямок деформації протилежний до напрямку в перерізі 1—1. Відхилення від круглості деформованої поверхні дорівнюють сумі абсолютних величин прогинів

$$\varepsilon_F = |f_1| + |f_2|. \quad (5)$$

Для розрахунку деформації у будь-якому перерізі кільця із заданим зусиллям закріплення можна скористатися залежностями [5]:

– у разі закріплення по зовнішній поверхні

$$f = \frac{Q_0 R^3}{EI} (-0,014 + 0,289 \varphi \sin \varphi); \quad (6)$$

– у разі закріплення по внутрішній поверхні

$$f = \frac{Q_0 R^3}{EI} (-0,0143 + 0,289 \varphi \sin \varphi), \quad (7)$$

де  $\varphi$  — кут перерізу, який розглядається, рад.

Схеми встановлення, методика та приклади розрахунку величини деформацій при закріпленні тонкостінних деталей викладено в літературі [4], [5].

Враховуючи, що варіації ширини та кількості кулачків на реальних об'єктах є трудомісткою та затратною операцією, дослідимо особливості лінійного пружного деформування тонкостінного циліндричного кільця кулачками трикулачкового патрона за допомогою параметричної 2D числової моделі в середовищі програмного комплексу ANSYS Academic Teaching. Модель розроблена для випадку закріплення в стиск і охоплює 1/6 частину технологічної системи «кільце — кулачки патрона» (рис. 2) і дає змогу виявляти вплив конструкції (розмірів і властивостей матеріалу) кільця, діаметра і ширини, відображеної центральним кутом  $2\alpha$ , опорної поверхні кулачка і створюваного кулачком навантаження на НДС кільця, радіальну деформацію і відхилення від круглості його отвору, ділянки фактичного контакту між кільцем і кулачком.

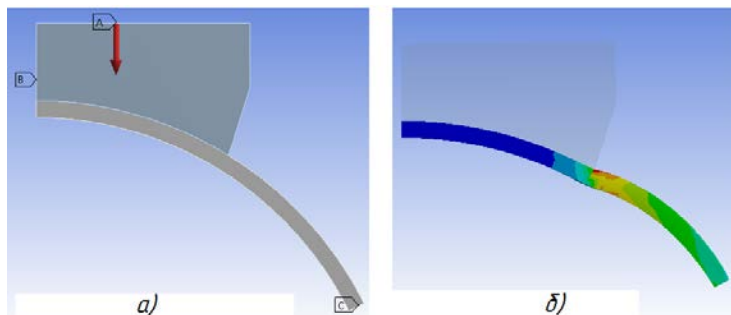


Рис. 2. Числова модель дослідження відхилення від круглості отвору циліндричного кільця:  
а — геометрична з обмеженнями Frictionless Support, навантаженням і контактом типу Frictionless;  
б — скінченно-елементна (масштаб радіальної деформації кільця збільшено в 920 разів)

Верифікація СЕ моделі виконана за допомогою порівняння результатів чисельного аналізу з обчисленими за відомими формулами величинами деформації кільця та відхилення від круглості його отвору закріпленням в патроні з вузькими ( $2\alpha = 20^\circ$ ) кулачками [1], [2] підтвердила її адекватність і точність. Розбіжність результатів за обома методами склала менше 2,5 %, що цілком достатньо для інженерного прогнозування.

Розміри опорної поверхні кулачків патрона оптимізували за критерієм мінімального відхилення від круглості отвору циліндричного кільця. Оптимізацію виконали у два етапи. Перший етап охоплює оптимізацію ширини опорної поверхні, а другий — оптимізацію її діаметра. Приклад графічної ілюстрації процедури поетапного виявлення оптимальних параметрів кулачка показано на рис. 3а—г.

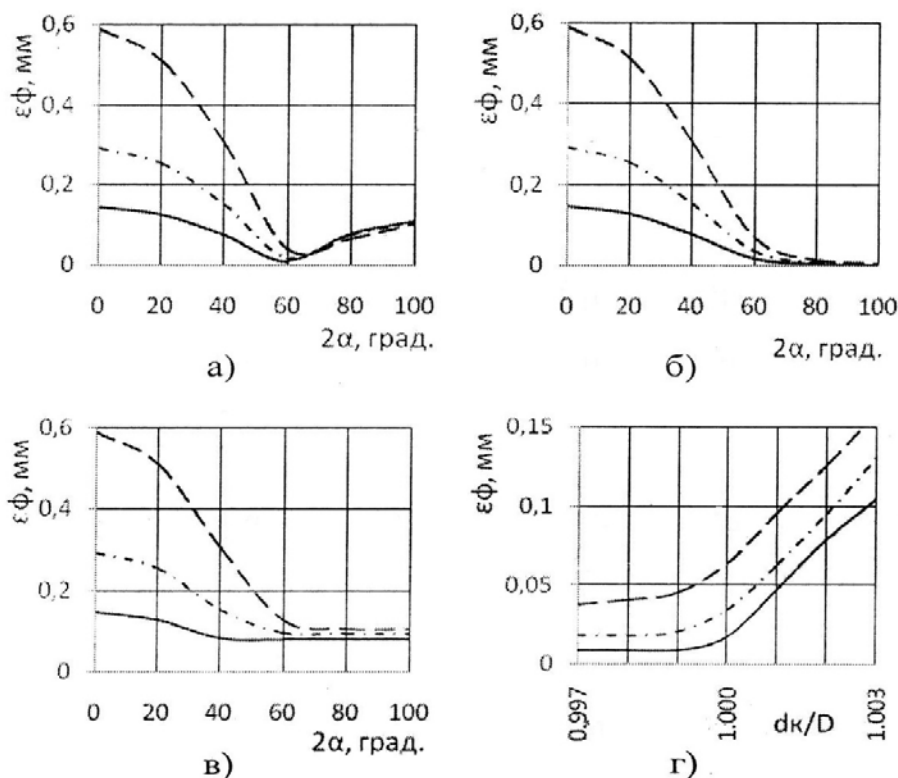


Рис. 3. Залежності відхилення від круглості отвору  $\varepsilon_F$  сталевго кільця кривиною 1/20 від:  
а—в — ширини  $2\alpha$  опорної поверхні кулачка; г — відношення  $d_K/D$  діаметрів кулачка і кільця в контакті ( $2\alpha = 60^\circ$ );  
а —  $d_K/D = 0,998$ ; б —  $d_K/D = 1,000$ ; в —  $d_K/D = 1,002$ ; навантаження на 1 мм довжини кільця (Н/мм):  
----- —  $P_n = 5$ ; - - - - - —  $P_n = 10$ ; — — — — — —  $P_n = 20$

Вивченням поведінки СЕ моделі для широкого діапазону навантажень і розмірів кілець, зокрема їхньої кривини (відношення товщини поперечного перерізу кільця до його середнього радіуса) в межах 1/5...1/20, виявлено, що відхилення від круглості отвору закріпленого в патроні кільця:

– збільшується лінійно зі збільшенням навантаження на кулачку ( $2\alpha < 60^\circ$ ), а також обернено пропорційно їхній кривині в третьому степені (для кілець малої кривини);

– зменшується зі збільшенням ширини кулачка до  $2\alpha = 60^\circ$ , при цьому найменші похибки досягаються для  $d_K/D < 1$ ;

– змінюється залежно від відношення  $d_K/D$  діаметрів опорної поверхні кулачка і базової (зовнішньої) поверхні кільця: збільшується для  $d_K/D < 1$  (рис. 3а), незначно зменшується для  $d_K/D = 1$  (рис. 3б) та практично не змінюється для  $d_K/D > 1$  (рис. 3в).

Отже, оптимальними розмірами опорної поверхні кулачків патрона є: ширина (її центральний кут)  $2\alpha = 60^\circ$ , діаметр  $d_K = (0,999...0,997)D$ .

### Висновок

Проаналізовано залежності для визначення пружних деформацій тонкостінного кільця у разі закріплення його в трикулачковому самоцентрувальному патроні — залежно від виду закріплення (в стиск, або в розтиск).

Дослідженням поведінки скінченно-елементної моделі для широкого діапазону навантажень і розмірів кілець, зокрема їхньої кривизни в межах  $1/5 \dots 1/20$ , виявлено, що відхилення від круглості отвору закріпленого в патроні кільця: збільшується лінійно зі збільшенням навантаження на кулачок ( $2\alpha < 60^\circ$ ), а також обернено пропорційно їхній кривині в третьому степені (для кілець малої кривини); зменшується зі збільшенням ширини кулачка до  $2\alpha = 60^\circ$ , при цьому найменші похибки досягаються для  $d_K/D < 1$ ; змінюється залежно від відношення  $d_K/D$  діаметрів опорної поверхні кулачка і базової (зовнішньої) поверхні кільця: збільшується для  $d_K/D < 1$ , незначно зменшується для  $d_K/D = 1$  та практично не змінюється для  $d_K/D > 1$ . Подано графічні залежності відхилення від круглості отвору  $\varepsilon_F$  сталевго кільця від ширини  $2\alpha$  опорної поверхні кулачка та відношення  $d_K/D$  діаметрів кулачка і кільця в контакті.

Імітаційним дослідженням пружного деформування технологічної системи «кільце—кулачки трикулачкового самоцентрувального патрона» за допомогою СЕ моделі визначені оптимальні параметри опорної поверхні кулачків за критерієм найменшого відхилення від круглості отвору кільця.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. С. Корсаков, *Основы конструирования приспособлений*. Москва, Россия: Машиностроение, 1983, 277 с.
- [2] Е. Ю. Денисова, «Технологическое обеспечение точности механической обработки тонкостенных деталей авиационных двигателей», автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.02.08, Технология машиностроения, ОГТУ. Омск, Россия, 2012.
- [3] Т. В. Галузина и А. В. Поляков, «Исследование изменений формы и расположения кольцевых заготовок малой жесткости» в *Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та*, № 3(27), Самара, Россия, 2011, с. 222-226.
- [4] В. С. Корсаков, *Основы конструирования приспособления*. Москва: Машиностроение, 1983, 277 с.
- [5] Б. М. Вардашкин, ред., *Станочные приспособления: справочник*, т. I. Москва: Машиностроение, 1984, 592 с.

Рекомендовано кафедрою технологій та автоматизації машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.09.2018

**Сторож Богдан Дмитрович** — канд. техн. наук, професор кафедри комп'ютеризованого машинобудування;

**Карник Роман Тимофійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованого машинобудування.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

**B. D. Storozh<sup>1</sup>**  
**R. T. Karpyk<sup>1</sup>**

## Finite-Element Simulation of Think-Wall Ring in the Three-Jaw Chuck

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

The article analyzes the designs of lathe chucks and establishes the main directions for their optimization design. Dependences were found for determining the elastic deformations of a thin-walled ring when it was fixed in a three-jaw chuck — depending on the type of fixation. The dimensions of the supporting surface of the chuck jaws were optimized by the criterion of the minimum error in the shape of the hole of the cylindrical ring fixed in it. The optimization was carried out in two stages. The first stage covers the optimization of the width of the support surface, and the second covers the optimization of its diameter. A study of the behavior of the finite element model for a wide range of loads and ring sizes, in particular their curvature (ratio of the thickness of the cross-section of the ring to its median radius) in the range  $1/5 \dots 1/20$ , found that the error in the shape of the hole of the ring fixed in the cartridge: increases linearly with increasing cam load, and inversely proportional to their third-degree curvature (for rings of small curvature) decreases with increasing cam width. In this case, for the ratio of the diameters of the bearing surface of the cam to the base (outer) surface of the ring: less than the one maximum errors are reached; close to one error decreases; more than one practically does not change. Graphical dependences the error in the hole shape of the steel ring from the width of the cam support surface and the ratio of the cam and ring diameters in contact. Investigation of the deformation of the constructed finite element model of the technological system "ring-cams of a three-jaw self-centering chuck" determined the optimal parameters of the cam surface by the criterion of the least error in the shape of the hole in the ring. Verification of the finite element model, performed by comparing the results of numerical analysis with analytically calculated values of the ring deformation and the error of its hole shape during

*fastening in a cartridge with narrow jaws confirmed its adequacy and accuracy. The discrepancy between the results for both methods was less than 2,5 %, which is quite enough for engineering forecasting.*

**Keywords:** three-jaw chuck, thin-walled ring, binding force, shape error, radial deformation, finite element simulation.

**Storozh Bohdan D.** — Cand. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Computer Engineering Manufacturing;

**Karpyk Roman T.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Computer Engineering Manufacturing

**Б. Д. Сторож<sup>1</sup>**  
**Р. Т. Карпик<sup>1</sup>**

## **Конечно-элементное моделирование закрепления тонкостенного кольца в трехкулачковом патроне**

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

*Проведен анализ конструкций токарных патронов и установлены основные направления для их оптимизационного проектирования. Приведены зависимости для определения упругих деформаций тонкостенного кольца при закреплении его в трехкулачковом патроне в зависимости от вида закрепления. Размеры опорной поверхности кулачков патрона оптимизировали по критерию минимальной погрешности формы отверстия закрепленного в нем цилиндрического кольца. Оптимизацию выполнили в два этапа. Первый этап охватывает оптимизацию ширины опорной поверхности, а второй — оптимизацию ее диаметра. Исследуя поведение конечно-элементной модели для широкого диапазона нагрузок и размеров колец, в частности их кривизны (отношение толщины поперечного сечения кольца к его срединного радиуса) в пределах 1/5...1/20, определено, что погрешность формы отверстия закрепленного в патроне кольца: увеличивается линейно с увеличением нагрузки на кулачок, а также обратно пропорционально их кривизне в третьей степени (для колец малой кривизны) уменьшается с увеличением ширины кулачка. При этом для отношения диаметров опорной поверхности кулачка к базовой (внешней) поверхности кольца: менее единицы достигаются максимальные погрешности; близкого к единице погрешность уменьшается; большего единицы практически не меняется. Приведены графические зависимости погрешности формы отверстия  $\epsilon_f$  стального кольца от ширины опорной поверхности кулачка и отношение диаметров кулачка и кольца в контакте. Исследованием деформации построенной конечно-элементной модели технологической системы «кольцо–кулачки трехкулачкового самоцентрирующегося патрона» определены оптимальные параметры опорной поверхности кулачков по критерию наименьшей погрешности формы отверстия кольца. Верификация конечно-элементной модели, выполненная с помощью сравнения результатов численного анализа с аналитически вычисленными величинами деформации кольца и погрешности формы его отверстия во время закрепления в патроне с узкими кулачками подтвердила ее адекватность и точность. Расхождение результатов по обоим методам составила менее 2,5 %, что вполне приемлемо для инженерного прогнозирования.*

**Ключевые слова:** трехкулачковый патрон, тонкостенное самоцентрирующееся кольцо, сила закрепления, погрешность формы, радиальная деформация, конечно-элементное моделирование.

**Сторож Богдан Дмитриевич** — канд. техн. наук, профессор кафедры компьютеризированного машиностроения;

**Карпик Роман Тимофеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры компьютеризированного машиностроения