

УДК 621.9

В.О. Залога, д-р техн. наук, О.Д. Пирогов, канд. техн. наук,
П.В. Рибалка, Є.В. Діденко, Суми, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ОТВОРІВ З ГЛУХИМИ ШПОНКОВИМИ ПАЗАМИ

Доказано, що наявність внутрішніх закритих переривчастих поверхонь суттєво впливає на якість (точність) механічного оброблення різанням робочих колес, а, відповідно, і на основні експлуатаційні показники машини в цілому: економічність, надійність і довговічність роботи.

Доказано, что наличие внутренних закрытых прерывистых поверхностей существенно влияет на качество (точность) механической обработки резанием рабочих колес, а, соответственно, и на основные эксплуатационные показатели машины в целом: экономичность, надежность и долговечность работы.

Proved that the presence of intermittent internal closed surfaces significantly affects the quality (accuracy) machining machining impellers, and, respectively, and the main performance indicators machines in general, efficiency, reliability and durability.

У машинобудуванні існує широка номенклатура деталей із шліцевими та шпонковими з'єднаннями. Наприклад, для насособудування характерними прикладами є: робочі колеса (РК), диски розгужочні, напівмуфти, втулки дистанційні тощо. В процесі обробки шліцевих та шпонкових пазів (ШП) можуть виникати такі відхилення форми та розмірів отворів, які в подальшому спричиняють труднощі у забезпеченні необхідної точності відповідних складальних одиниць, наприклад, роторів відцентрових насосів або компресорів, що у багатьох випадках може супроводжуватися як неможливістю складання тієї або іншої машини в цілому, так і суттєвим зниженням її працездатності та довговічності. Тому підвищення якості складальних процесів за рахунок удосконалювання технологічних процесів виготовлення усіх деталей основних складальних одиниць енергетичних машин є задачею актуальною і своєчасною. Особливо це стосується сучасних високооборотних роторних машин (насосів, компресорів) у зв'язку з постійним ростом вимог до їх функціональних характеристик, що пов'язані з підвищенням показників вібронадійності та зменшенням радіальних зазорів між деталями, які є нерухомими (статором) та обертаються (ротором). Метою цієї роботи є аналіз виробничих технологічних процесів та удосконалення технології фінішної обробки центрального отвору з глухим ШП однієї з основних деталей ротора відцентрової машини високого тиску – РК.

Ротор відцентрової машини є однією з тих основних складальних

одиниць, що в значній мірі забезпечує його основні експлуатаційні показники: економічність, надійність і довговічність роботи. Ротори можуть бути одноступінчасті (рис. 1) та багатоступінчасті (рис. 2). Базовою деталлю ротора є вал, на якому встановлюють робочі колеса, захисні втулки, деталі гідравлічного розвантажувального пристрою, напівмуфта та інші деталі (рис. 2).



Рисунок 1 – Одноступінчастий ротор відцентрового насосу

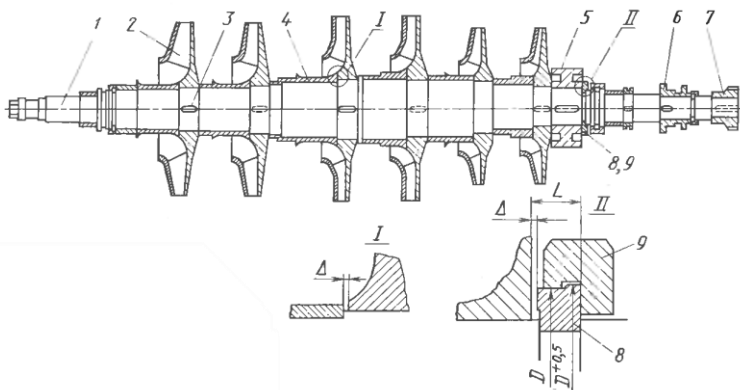


Рисунок 2 – Багатоступінчастий ротор відцентрового компресору високого тиску:

- 1 – вал, 2 – робоче колесо, 3 – шпонка, 4 – дистанційна втулка,
5 – розвантажувальний поршень, 6 – диск напірний, 7 – зубчаста втулка
(частина муфти), 8 – стяжне кільце, 9 – стопорне кільце

Для зменшення перетоків робочого середовища (рідини, повітря тощо), що перекачується, по валу між ступенями, завдяки у т.ч. і наявності зазору Δ , що може суттєво впливати на коефіцієнт корисної дії роторної машини, ШП в отворі маточини РК виконують не на всю її довжину, тобто виконують отвори з глухими шпонковими або шліцевими пазами (рис. 3).

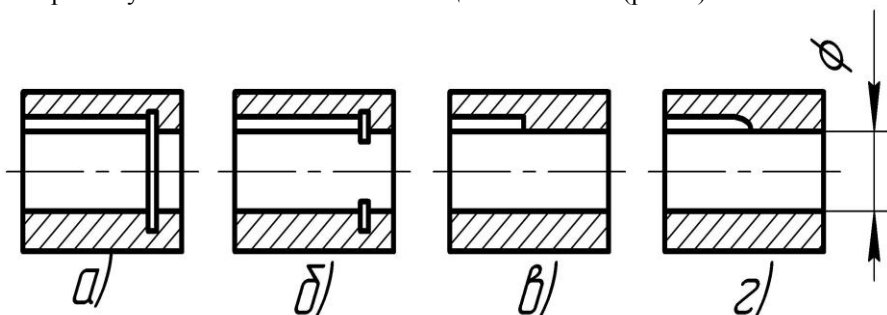


Рисунок 3 – Різновиди закритих шпонкових пазів в отворах

Такий конструктивний елемент відноситься до нетехнологічних і є серйозною проблемою у компресорно- та насособудуванні, тому що при виготовленні РК:

- необхідно застосовувати (найчастіше) низькопродуктивну довбальну операцію (рис. 4) замість протяжної у разі, коли паз є відкритим;
- для виходу довбального різця, як правило, необхідна додаткова токарна операція по виготовленню кільцевої канавки (рис. 3а) або вифрезерування сегмента (рис. 3б), що спричиняє додаткові напруження навантаженої маточини і ускладнює послідовую чистову обробку отвору;
- для врівноваження при балансуванні додатково повинна виконуватись протилежна (під 180°) (рис. 2 б) «холоста» канавка, ШП повинен «заповнюватися» шпонкою;
- при довбальній операції складно забезпечити без адаптерів вимоги по зміщенню та перекосу ШП;
- при довбальній операції необхідно, щонайменше, 3 переходи: чорновий, чистовий та зняття завусенців. Останній перехід, як правило, виконують вручну;
- строгання по копіру (рис. 2 г) потребує спеціальних пристроїв.



Рисунок 4 – Довбальна операція

Практична реалізація такої технології спричиняє наступні неточності отвору:

1) обробка пазу руйнує сформовану в процесі механічної та термічної обробки отвору рівновагу внутрішніх напружень в РК, що приводить до їх перерозподілу та, відповідно, деформації маточини, в результаті чого знижується точність отвору;

2) в результаті перших проходів довбача, за рахунок малих подач (малих товщин різання) і наявності радіусу округлення різальної кромки, на бокових поверхнях пазу пластичне «відтиснення» матеріалу зрізаного шару утворює «спучення» матеріалу (рис. 5 а), які впливають на круглість поверхні отвору. Крім того, завдяки наявності такого явища, як технологічна спадковість, протягом всього подальшого маршруту фінішної обробки центральних отворів РК цей дефект буде позначатися на їхніх точнісних показниках;

3) при закріпленні колеса в трьохкулачковому патроні при формуванні пазу (шліців) поверхня отвору може бути деформована, тобто може виникати її «огранка» (рис. 5 б).

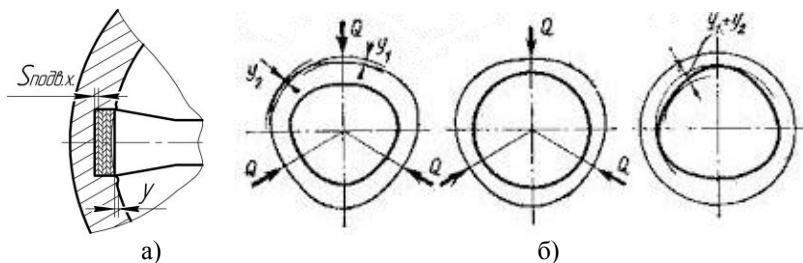


Рисунок 5 – Схема виникнення похибок форми отвору:

Q – сили зажиму у трьохкулачковому патроні; y , y_1 та y_2 – відхилення отвору від круглості

Дослідження [1] показали, що неточність отвору в маточині РК є одним із важливих елементів комплексу факторів, що призводять до перекосу вісей валу та РК відцентрової машини, формування невеликих виступів поверхні – місця «зародження» задирів, в результаті чого відбувається пошкодження («загрязнення») матеріалу при складанні / розбиранні ротора (рис. 6).

Разом з тим, зважаючи на високі робочі частоти обертання ротора (зазвичай працює в «за критичній» області частот), однією з основних вимог, що пред'являються до цієї складальної одиниці (ротора) є необхідність забезпечення високої динамічної збалансованості вузла. Невиконання цієї вимоги на робочих частотах обертання ротора може привести до виникнення вібрацій, додаткових ударних навантажень на опори ротора, підвищеного зносу і, як наслідок, до передчасного виходу машини з ладу або виникнення аварійної ситуації.

По розробленій методиці були проведені контрольні вимірювання (безпосередньо у цехових умовах, після виконання операцій відповідно до існуючого (традиційного) технологічного процесу) виділеної партії РК для визначення ступеня впливу різних факторів на точність отвору Ø95H7.

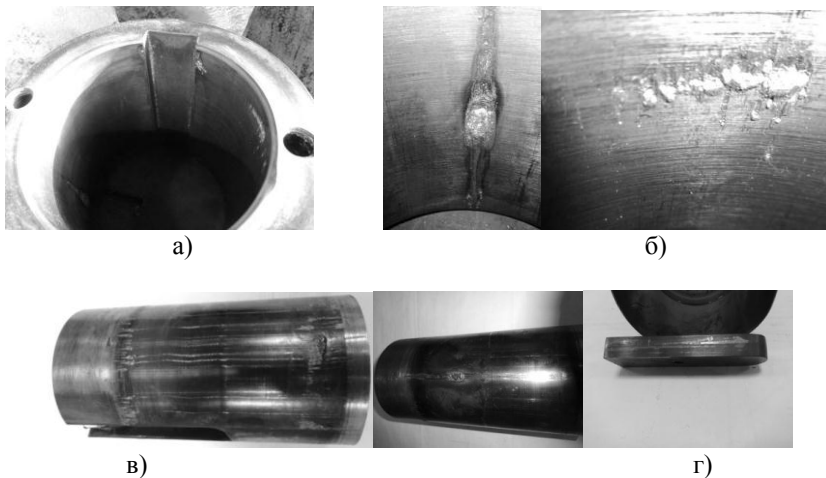


Рисунок 6 – Пошкоджені при складанні елементи ротора конденсатного насосу КСВА 1500-120-2:

а – задир біля ШП; б – задир на поверхні отвору РК; в – пошкодження на зрізаній частині валу; г – задир, схоплення і переноси на робочій боковій поверхні шпонки

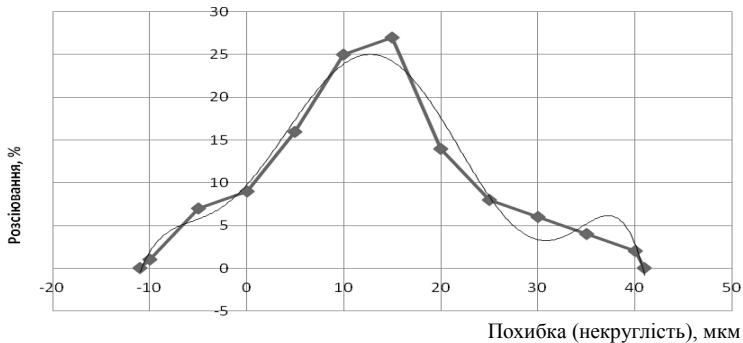


Рисунок 7 – Розподіл похибки розмірів отвору РК контрольованої партії оброблених за заводським (традиційним) маршрутом

В результаті аналізу встановлено, що розсіювання похибки отвору підкорюється закону, близькому до нормального (закон Гауса), причому розмах похибки складає 50 мкм (від (-10) до (+40) мкм) (рис. 7). Крім того, виявлено зв'язок між технологічною спадковістю та якістю вихідних параметрів РК, і як наслідок, ротора і відцентрової машини (насосу або компресора) в цілому. Відносно велика вихідна похибка геометричної форми при токарній обробці отвору та формуванні пазу на довбальному верстаті, високі твердість поверхні (HRC 36-43) і технічні вимоги до якості отворів РК викликають значні труднощі при їх фінішній обробці і потребують (щонайменше) поліпшення конструкцій інструменту для успішної реалізації процесу хонінгування, який також майже не використовується у традиційній (заводській) технології обробки отворів з переривчастими поверхнями (рис. 8).



Рисунок 8 – Хонінгування отворів на вертикально-хонінгуальному верстаті

Обмеження на використання традиційних конструкцій хонінгувальних голівок при обробці ШП в РК пов'язано з ударами брусків при контакті з краями пазів і втрати радіального зусилля при проходженні бруском «пустоти» (пазу), що призводить до зміни форми отвору як у поперечному, так і повздовжньому перетинах. Для забезпечення посадки основних деталей ротора без перекосів, задирів, а також використання сторонніх тіл між посадочними поверхнями при забезпеченні необхідних натягів і зазорів (теплових зазорів), що сприяє збалансованій, мало- або безвібраційній роботі ротора [2], запропоновано обробку переривчастих поверхонь отворів на чистовій операції новим комбінованим інструментом для хонінгування та притирки та проведені експерименти на робочих зразках з визначення можливостей їхнього застосування. З урахуванням рекомендацій [3], при хонінгуванні шпонкових (рис. 9) та шліцевих (рис. 10) отворів для підвищення їхньої якості запропоновано використання спеціальних брусків, ширина яких залежить від ширини ШП, та їх розташування у наступних співвідношеннях:

- для отворів зі шпонковими пазами -

$$B\delta = (1,5 - 2) \cdot Bn; \quad (1)$$

- для отворів зі шліцевими пазами -

$$B\delta = (2 - 2,5) \cdot (bn + bu), \quad (2)$$

де $B\delta$ (B) – ширина бруска, Bn (bn) і bu – ширина впадини (пазу) та шліцю (виступу), відповідно.

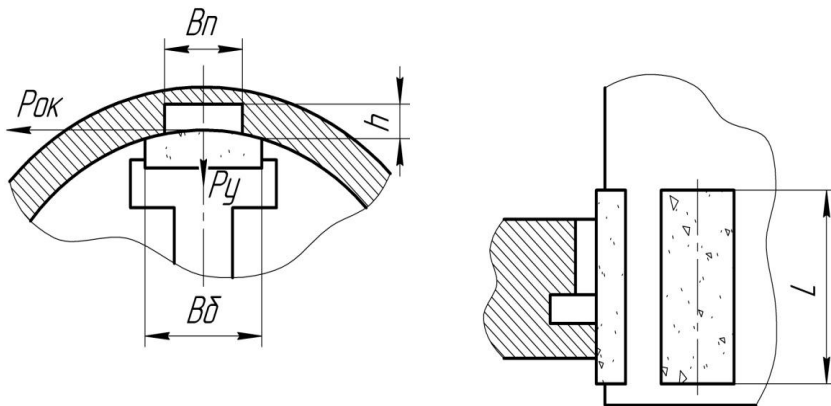


Рисунок 9 – Схема хонінгування отворів з глухим ШП

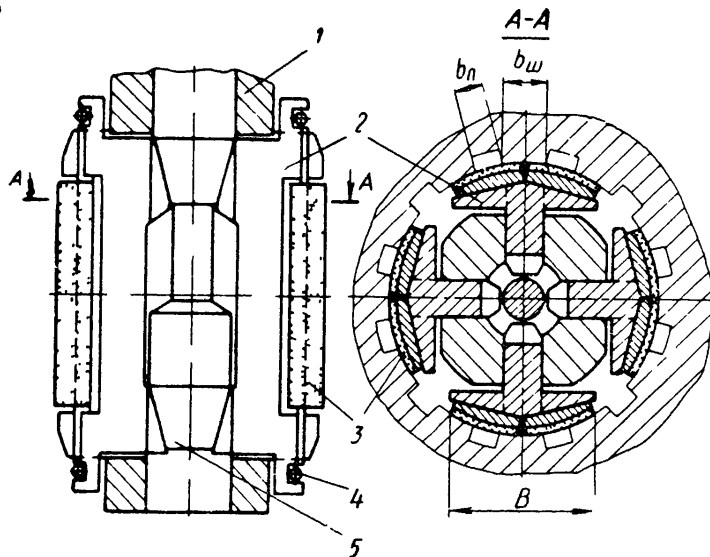


Рисунок 10 – Хонінгувальна голівка для обробки шліцевих отворів:

1 – державка головки; 2 – колодка; 3 – хонінгувальний брусок;

4 – пружина; 5 – розтискний конус

До недоліків даної схеми можна віднести можливе заклинювання головки у зв'язку зі значно збільшеною площею контакту брусків з поверхнею отвору і навіть в деяких випадках поломка брусків, особливо при зніманні підвищених припусків. Крім того, достатньо трудомістким є також і процес установки брусків на заданий розмір, що часто супроводжується погіршенням якісних показників процесу чистової (фінішної) обробки отворів з переривчастими поверхнями.

З метою покращення якості оброблених РК випробувана додаткова ручна притирка отвору $\gamma 95H7$ цільним чавунним притиром з абразивним порошком (рис. 11). Притиру надавалося обертання з частотою 15 об/хв. і повздовжнє переміщення зі швидкістю $V_s = 2$ м/хв. У процесі притирання знімався припуск 0,03 мм на сторону.

Результати обробки отворів у РК із Сталі 20X13 наступні:

- 1) некрутість з 0,05мм скоротилася до 0,01мм;
- 2) шорсткість з $Ra=2.5$ знизилась до $Ra=1.0$ мкм;
- 3) машинний час обробки одного РК складав 13хв.

Таким чином, додаткова операція (притирка) дозволила дещо підвищити якісні показники чистової обробки хонінгувальними брусками. Разом з тим, були виявлені і деякі недоліки. По-перше, цей варіант не підходить для серійного виробництва, бо стійкість притира складає всього 8-10 РК. Крім того, ручна притирка є занадто трудомісткою та вимагає робітників високої кваліфікації і досить часто не забезпечує надійності при складанні виробу, бо відбувається шаржування обробленої поверхні абразивом, який не завжди вдається видалити.



Рисунок 11 – Використання притира (а) для фінішної обробки отворів (б) в РК

Аналіз результатів, проведених за розробленою технологією експериментів, дозволив об'єднати позитивні властивості вказаних методів хонінгування та притирки-доводки з метою виключення недоліків, що їх супроводжують. Розроблено новий «гібридний» інструмент, який отримав назву «хонопритир». Цей інструмент працює з використанням прицеzipної абразивно-шліфувальної шкурки з точною товщиною та направленими зернами (рис. 12, 13).

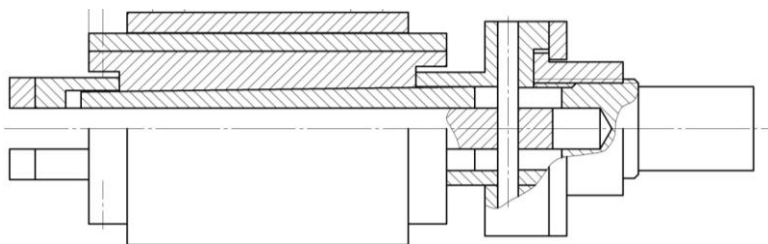


Рисунок 12 – Схематичне зображення загального вигляду нового інструменту

Складається новий інструмент із наступних основних елементів: корпусу, на якому закріплюються сегменти зі шкуркою; механізму розжиму і оправки для установки у шпіндель верстату.



Рисунок 13 – Хонопритир: а – загальний вигляд; б – у розібраному вигляді



Рисунок 14 – Обробка хонопритиром втулки ротора на верстаті (а) та ручним методом (б)

Результати дослідно-експериментальних робіт підтвердили ефективність обробки РК хонопритиром (рис. 14) навіть при серійному типі виробництва. Контроль РК з розмірами отворів $\gamma 95H7$ показав підвищення точності оброблених отворів, про що свідчить зміна кривої розсіювання (близька до закону ексцентриситету (закон Релея)) їх розмірів (рис. 15) і зменшення

розмаху похибок (від 0 до (+35) мкм), та підтвердив відповідність практично усіх деталей, що контролювалися, вимогам креслення.

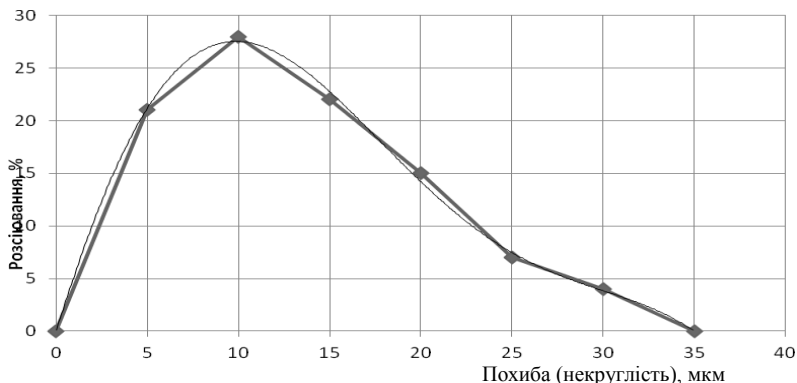


Рисунок 15 – Графічна залежність результатів обмірів РК після обробки згідно запропонованої технології

Висновки. У результаті виконаної роботи можна зробити наступні висновки:

1) якість однієї з основних складальних одиниць високооборотних роторних машин (відцентрових насосів та компресорів) ротора в значній мірі залежить від якості отворів у РК, які мають, як правило, закриті переривчасті поверхні (шпонкові або шліцеві);

2) наявність внутрішніх закритих переривчастих поверхонь суттєво впливає на якість (точність) механічної обробки різанням РК, а, відповідно, і на основні експлуатаційні показники машини в цілому: економічність, надійність і довговічність роботи;

3) аналіз існуючих (заводських) технологічних процесів і фактичних виробничих умов виготовлення РК, центральні отвори яких мають закриті шпонкові та шліцеві пази, підтвердив їхні недоліки у забезпеченні потрібної якості (точності) та показав необхідність їх удосконалення;

4) підтверджена наявність зв'язків технологічної спадковості протягом всього маршруту виготовлення центральних отворів РК;

5) визначені найбільш значущі фактори, що впливають на ключові вихідні параметри відцентрових роторних машин, та запропоновані шляхи зменшення (або усунення) їх впливу на величину похибок;

6) запропоновані удосконалені конструкції хонінгувальних головок та технологічні процеси обробка центральних отворів робочих колес із закритими шпонковими та шліцевими пазами;

7) запропонована конструкція нового гібридного інструменту («хонопритира»), використання якого дозволило сумістити дві технологічні операції (хонінгування та притирку) і підвищити точність оброблених поверхонь із закритими пазами.

Список використаних джерел: 1. Пирогов, А.Д. Совершенствование технологии изготовления роторов многоступенчатых насосов. Безопасность эксплуатации компрессорного и насосного оборудования: монография; под ред. В.С. Марцинковского, В.Б. Тарельника, А.В. Загоруйко. – Сумы: ООО «ПД Папирус», 2014. – С. 240-245. 2. Технология компрессоростроения / Н.А. Ястребова [и др.]. - М.: Изд-во Машиностроение, 1987. – 336 с. 3. Бабичев, А.П. Хонингование / А.П. Бабичев. - М. : Изд-во Машиностроение, 1965. - 96 с.

Bibliography (transliterated): 1. Pirogov, A.D. Sovershenstvovanie tehnologii izgotovlenija rotorov mnogostupenchatyh nasosov. Bezopasnost' jekspluatacii kompressornogo i nasosnogo oborudovanija: monografija ; pod red. V.S. Marcinkovskogo, V.B. Tarel'nika, A.V. Zagorul'ko. – Sumy: ООО «PD Papirus», 2014. - S. 240-245. 2. Tehnologija kompressorostroenija / N.A. Jastrebova [i dr.]. - M.: Izd-vo Mashinostroenie, 1987. – 336 s. 3. Babichev, A.P. Honingovanie / A.P. Babichev. - M. : Izd-vo Mashinostroenie, 1965. - 96 s.

Надійшла до редколегії 23.12.2014