

**Віктор Сергійович Плис<sup>1</sup>, Іван Михайлович Дегтярьов<sup>2</sup>,  
Анна Олександрівна Нешта<sup>3</sup>, Олександр Миколайович Метенко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** [v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-1635-3839>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** [ivan\\_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:ivan_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8535-987X>

**Scopus Author ID:** 57192084069

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** [anna\\_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:anna_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4072-5439>

**Scopus Author ID:** 55884734500

<sup>4</sup>студент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** [sashamet14@gmail.com](mailto:sashamet14@gmail.com)

## **РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ КАНАЛІВ АПАРАТІВ СПРЯМОВУВАЛЬНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ**

*На основі використання методик проектування верстатних пристроїв, заснованих на локальній фіксації заготовок силами закріплення на мінімальній кількості поверхонь та технологічних можливостей сучасних металорізальних верстатів розроблено конструкцію верстатного пристрою для встановлення деталей типу апарат спрямовувальний при обробленні каналів на фрезерних або багатопільових верстатах вертикального компоновання. Уперше визначено статичну жорсткість верстатного пристрою на основі розтискної цанги для оброблення каналів апаратів спрямовувальних. Виконано чисельне моделювання напружено-деформованого стану розробленого верстатного пристрою та отримані значення величин переміщень і напружень.*

**Ключові слова:** точність; чисельне моделювання; методика; жорсткість, відхилення; похибка; резонанс; напруження; переміщення; базування.

*Табл.: 1. Рис.: 10. Бібл.: 20.*

**Актуальність теми дослідження.** Згадка про перші механічні насоси в житті людства з'явилася ще в I столітті нашої ери, їх використовували для подачі води при гасінні пожеж. З появою електричних і парових двигунів насоси почали набувати більшого поширення і популярності.

Насос – це гідравлічна машина, яка використовується для перекачування і створення напорів рідин, суспензій або зріджених газів за допомогою штучно створеного тиску. Відцентрові насоси є найбільш поширеними не лише в Україні, а й у всьому світі серед усіх інших видів насосів. Їхню популярність можна пояснити максимальною продуктивністю, високою надійністю та широкими можливостями застосування. Вони використовуються в багатьох галузях промисловості як для комерційного, так і для домашнього застосування, тому що вони можуть переміщувати більшу кількість рідини порівняно з іншими типами насосів на ринку.

Відцентрові насоси можуть бути різних розмірів – від малогабаритних (потужністю до 1 кВт, що використовуються зазвичай у побутових або малих промислових системах) до великогабаритних потужних (потужністю понад 50 кВт, які використовуються в комунальних, промислових і великих інфраструктурних системах, а також на водосховищах, електростанціях) і можуть мати різну конструкцію, але їх принцип дії та гідродинамічні характеристики завжди будуть подібними. Серед основних конструктивних елементів відцентрового насоса можна виділити наступні: ротор із робочими колесами, секції зі спрямовувальними апаратами, ущільнення та підшипники.

Найважливішою частиною секції відцентрового насоса є апарат спрямовувальний (АС), бо ця деталь направляє потік рідини у вихідний трубопровід, тому профіль його каналів і мінімальний спротив течії є основними показниками, що впливають на КПД. Проте такий конструктивний елемент АС як його канали викликає найбільші складнощі в процесі виготовлення через геометричну форму та розташування, їхня тонкостінність і погану інструментальну доступність при обробці. АС в основному виготовляють з чавунів, високолегованих корозійностійких жароміцних сталей мартенситного класу, високолегованих жароміцних нержавіючих сталей аустенітного класу. Проте останнім часом дедалі більшого поширення набуває виготовлення великої кількості деталей, у тому числі і апаратів спрямовувальних, з композитних матеріалів, що вказує на інтенсивний розвиток технологій, а їх обробка [1] дає нові виклики науковцям і виробництвам.

Враховуючи форму АС та його геометричні особливості, раніше для виготовлення деталей такого типу використовували поворотний стіл та синусну плиту, або наклонно-поворотний стіл. Рідше розроблявся спеціальний верстатний пристрій (ВП), який можна було використати для виготовлення лише конкретного АС і не можна було використовувати для виготовлення інших [2; 3]. Також ці пристрої занадто громіздкі, недостатньо жорсткі через велику кількість елементів конструкції і висоту встановлення апарату відносно столу верстата, а також під час оброблення витрачається велика кількість часу на додаткові переміщення і повороти, що призводить до суттєвого збільшення допоміжного часу, який за даними технологічних карт, що були проаналізовані на підприємствах, складав від 20 до 30 хвилин залежно від конструкції апарату, кількості каналів тощо.

Останніми роками дедалі більшої популярності й застосування набули верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), які мають більшу точність і більш широкі можливості. Використання верстатів з ЧПК зробило процес виготовлення АС простішим, дозволило скоротити час і підвищити точність, а також суттєво зменшити габарити спеціальних ВП чи взагалі від них відмовитись, закріпивши заготовку для оброблення безпосередньо до столу верстата, використовуючи Т-подібні пази. При такому варіанті виготовлення АС базування заготовки відбувається за допомогою спеціальної оправки, яка хоч і має значно компактніші розміри в порівнянні зі спеціальними чи стандартними ВП, проте може бути використана лише для обробки конкретного апарату. Будь-який з вищеперелічених варіантів базування і закріплення заготовки все одно має недоліки, оскільки при обробці заготовка має бути перезакріплена, а це призводить до суттєвих витрат допоміжного часу, що для АС середніх розмірів становить від 10 до 15 хвилин [2]. Також можливості обробити всі канали за одне закріплення перешкоджають прихвати, через які суттєво зменшується інструментальна доступність.

Підприємствам постійно необхідно оновлювати обладнання та технології, а також запроваджувати новітні підходи до виробничого процесу для виготовлення конкурентоспроможної продукції. Номенклатура насосів, а відповідно і АС, постійно зростає, оновлюються моделі та змінюються технічні характеристики і при цьому скорочується час, відведений для виходу продукції на ринок. Тому актуальним завданням є розроблення переналагоджуваних ВП.

Зазвичай верстатний парк підприємств, що виготовляють чи обслуговують відцентрові насоси, містить досить велику номенклатуру різноманітних верстатів і обробних центрів – як універсальні, так і з числовим програмним керуванням. Враховуючи, що постійно відбувається модернізація насосного обладнання з метою підвищення міжремонтних інтервалів, ефективності його роботи та ККД, а також існує широка номенклатура встановлених насосів і багато варіантів їх модернізації, то тримати на складах таку кількість запасних частин усіх типорозмірів, яка б могла задовольнити всі потреби не тільки економічно не вигідно, а й не має жодного сенсу з технічного погляду, бо після модернізації ці запасні частини не будуть потрібні.

У цій статті акцент буде зроблено саме на виготовленні деталей та запасних частин типу АС відцентрового насоса. Є дуже широка номенклатура АС, але розглядатися в даній статті будуть саме тонкостінні АС середніх діаметрів, які за обсягом виготовлення є найбільш поширеними [2]. Виробництво тонкостінних АС ускладнюється тим, що окрім вищеперерахованих викликів при їх виготовленні ще необхідно запобігти відхиленню від форми, яке можна зробити при затисканні через прихвати.

Тому при конструюванні технологічного оснащення потрібно враховувати всі вищеперелічені моменти.

Важко переоцінити роль відцентрових насосів у житті людства, адже вони набули настільки значного поширення, що неможливо уявити життя без них. Виробники насосної продукції DALGAKIRAN [4] та ASCO Pompe [5] з багаторічним стажем розповідають про переваги саме відцентрових насосів, а також наочно показують їхню номенклатуру.

Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажу та експлуатації відцентрових насосів, а також технічні умови регламентуються стандартами [6-9].

Відцентрові насоси є найбільш поширеним типом насосів. Від чутливих промислових – таких як насоси живильної води для котлів або насоси для охолодження води на атомній електростанції – до простіших – таких як насоси підвищення тиску питної води в житлових комплексах. Правильний вибір відцентрового насоса є важливим, тому в публікації [10] автори представляють методологію вивчення та розпізнавання відцентрових насосів.

У статті [11] зазначається, що ВП є ключовим обладнанням у виробництві, яке виконує завдання позиціонування, підтримки та фіксації компонентів, а також проводиться систематичний огляд літератури щодо всіх концепцій верстатних пристроїв, які нині використовуються, а також усіх нових розробок і досліджень за останні 10 років. Підсумовуючи аналіз, автори зазначають, що верстатні пристрої є дуже важливою частиною виробничого процесу й в окремих галузях витрати на їх розробку й виробництво можуть складати до 29 % від загальних інвестицій.

Іванов та інші в роботі [12] зазначають, що обробка деталей на металорізальних верстатах не може бути забезпечена без використання ВП. Вони є невід'ємною частиною замкнутої технологічної системи «верстат – ВП – різальний інструмент – заготовка» і істотно впливають на точність і якість обробки поверхонь деталей машин. Також у роботі представлено структурні етапи автоматизованого проектування ВП та визначено потоки даних між ними для забезпечення комплексного підходу.

Про важливість гнучких ВП у сучасному виробництві є інформація у статті [13] авторів Віталія Іванова та Йозефа Зайця. Вони наголошують на тому, що ВП відіграють важливу роль у виробництві високоякісної та конкурентоспроможної продукції в багато-профільному виробництві, а також описують шляхи підвищення ефективності механічної обробки деталей, які сприяють підвищенню ефективності планування виробництва.

У роботі [14] висвітлюється те, що різноманітність продукції збільшується, а її життєвий цикл скорочується, тому, щоб бути ефективними, підприємствам необхідно адаптувати різні підходи до розробки – на зміну класичному проектуванню ВП приходять проектування на основі методів оптимізації із застосуванням штучного інтелекту, що включає в себе: планування налаштування, планування кріплень, проектування та перевірка. Для кожної з цих сфер розробляються різні методології. Основною метою цієї дослідницької роботи є інтеграція сегментованих методологій в одну інтегровану методологію.

Гнучкі ВП застосовуються в багатьох сферах, приклад їх використання у виробництві частин літака, а також при його збиранні описують Hui Li та ін. [15] у своїй публікації. Вони роблять висновки, що завдяки використанню гнучкого ВП значно знижується вартість виробництва та підвищується його ефективність, а також підвищується точність.

Сучасні тенденції, спрямовані на скорочення часу виходу продукції на ринок, а також збільшення її асортименту, неможливі без використання переналагоджуваних ВП. На прикладі дизайну пристрою автори роботи [16] представляють підхід, який дозволяє виконати гнучке забезпечення та реконфігурацію обладнання завдяки конструкції верстатного пристрою.

Гнучкі верстатні пристрої знаходять широке застосування при обробці тонкостінних деталей. У роботі [17] висвітлюється питання реконфігурації гнучких ВП, а також спосіб зменшення деформації, і, як результат, підвищення якості кінцевої продукції при виготовленні тонкостінних деталей.

Автори роботи [18] запатентували переналагоджуваний ВП для оброблення деталей типу шатуни, що свідчить про важливість проектування і використання гнучких переналагоджуваних ВП для деталей різних типів.

Основною проблемою під час закріплення АС на верстаті або у пристрої є великий обсяг поверхонь каналів, що підлягають обробленню та при цьому залишається досить мало поверхонь для закріплення.

Також ВП має бути достатньо жорстким для реалізації можливостей сучасних метало-різальних верстатів та різальних інструментів, при цьому бути переналагоджуваним для встановлення заготовок у максимально можливому завчасно розрахованому діапазоні розмірів згідно з конструктивними характеристиками з мінімальними затратами часу та коштів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх публікацій та досліджень показав, що питанням виготовлення верстатних пристроїв, які вирішують масу існуючих проблем, займалися багато науковців і воно дуже актуальне. Проте серед маси технічних рішень чи часткових рекомендацій щодо проектування ВП для обробки тонкостінних АС середнього розміру при огляді багатьох літературних джерел (як статей, так і підручників), виявилось недостатньо для розроблення конструкції ВП, що забезпечує необхідні технічні параметри операції. Також саме для таких ВП не проводився їх розрахунок за допомогою методів чисельного моделювання.

**Постановка завдання.** Враховуючи нестачу ВП для обробки тонкостінних спрямовувальних апаратів середнього розміру основним завданням буде розроблення конструкції такого пристрою, який буде мати достатню інструментальну доступність, жорсткість, точність та надійність закріплення протягом усього процесу оброблення та не деформує оброблювану заготовку при цьому.

**Метою статті є** розроблення конструкції ВП для оброблення каналів АС за один установа та доведення його працездатності шляхом чисельного моделювання.

**Методика дослідження.** АС (рис. 1) є одним з найважливіших елементів відцентрового насоса, який безпосередньо впливає на термін експлуатації насоса та виконання ним службового призначення. АС здійснює відведення рідини від робочого колеса попереднього ступеня з мінімальними втратами та підведення потоку до колеса наступного ступеня, таким чином перетворюючи кінетичну енергію в тиск.

Враховуючи, що відцентрові насоси є різних типорозмірів починаючи від малогабаритних і закінчуючи великогабаритними промисловими, то розміри і конструкція АС відповідно можуть бути різними. Для визначення розмірів найбільш розповсюджених насосів, а відповідно і АС, а також для актуальності дослідження при співпраці з інженерами машинобудівних підприємств Сумської області, які займаються виготовленням насосного обладнання – АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», ПрАТ «Свеський насосний завод», АТ «СМНВО - ІНЖІНІРИНГ» та ТОВ «ТРИЗ ЛТД», які надали доступ до своїх креслень насосів, що виробляються на їх базі, було проаналізовано мінімум по десять найменувань креслень кожного з видів насосів різних габаритів.

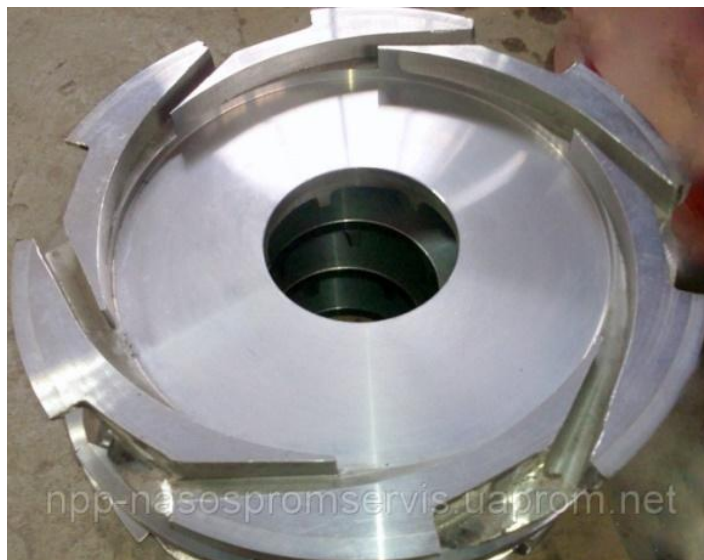


Рис. 1. Приклад (фотографія) реального АС [19]

Джерело: <https://nasos-2005.com/ua/p239219255-zapchasti-nasosam-tsns.html>.

Аналіз креслень (рис. 2) на виробництвах вищеперелічених машинобудівних заводів Сумської області, що займаються виготовленням насосного обладнання, дозволив розподілити АС за габаритними розмірами. Серед обсягу апаратів, що були проаналізовані, а це від малих (діаметром 150 мм) до великих (діаметром 600 мм), більшість апаратів, а саме  $\frac{2}{3}$ , або ж приблизно 66 %, складають апарати середнього розміру діаметром від 220 мм до 380 мм, що корелює з законом нормального розподілу випадкових величин [3]. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що більшість насосів, які виробляються в нашому регіоні, належать до насосів так званого середнього класу, відповідно АС можна також віднести до апаратів середніх розмірів.

Об'єктом дослідження було обрано АС. АС залежно від службового призначення насоса, мають досить різні розміри, серед яких було обрано апарат середнього розміру, що вже згадувалось вище вони є найбільш поширеними. При цьому максимальна увага приділяється конструкції, яка виглядає найбільш складною з погляду виготовлення через досить тонкі стінки каналів і великий внутрішній діаметр (рис. 3), що своєю чергою ускладнює процес закріплення та перезакріплення, а також перешкоджає інструментальній доступності при обробці.

Цей АС входить до складу гідродинамічного вузла відцентрового насоса ЦН 35/400, який призначений для перекачування дихлоретану при виробництві хлорвінілу. Основні параметри АС (рис. 4):

- кількість каналів – 6;
- зовнішній діаметр – 290 мм;
- внутрішній (посадочний/посадковий) діаметр – 210 мм;
- товщина – 44 мм;
- найменша товщина стінки каналу – 3 мм;
- найбільша товщина стінки каналу – 27,25 мм;
- ширина каналів – 12,5...16,6 мм;
- точність перелічених розмірів – IT14;
- матеріал – корозійностійка сталь 20X13 ДСТУ 5632-2016;
- маса – 4,79 кг.

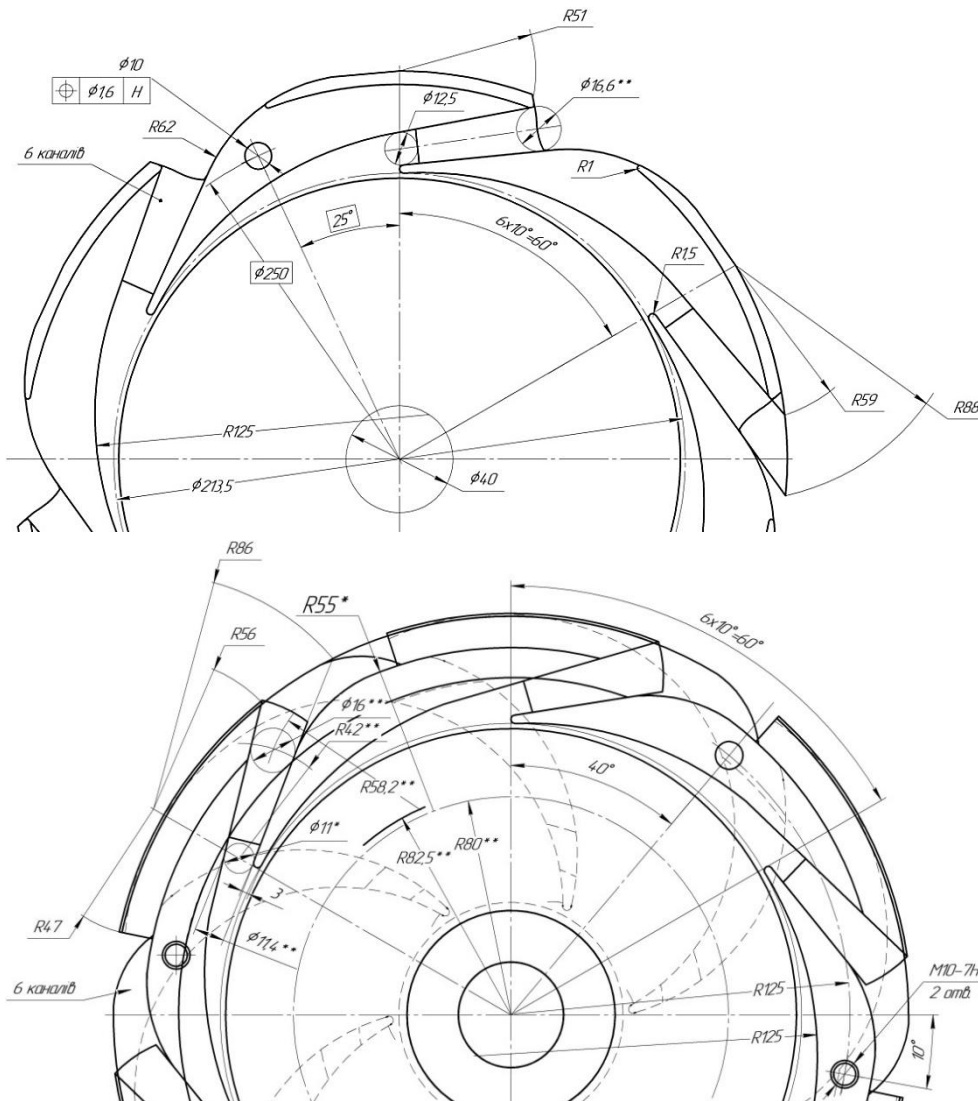


Рис. 2. Приклади (фрагменти креслень) АС середніх типорозмірів  
Джерело: розроблено авторами.



Рис. 3. 3D-модель АС, який обраний як об'єкт дослідження  
Джерело: розроблено авторами.

За даними базового (заводського) технологічного процесу допоміжний час на установку на вертикально-фрезерній із ЧПК операції становить 12 хвилин.

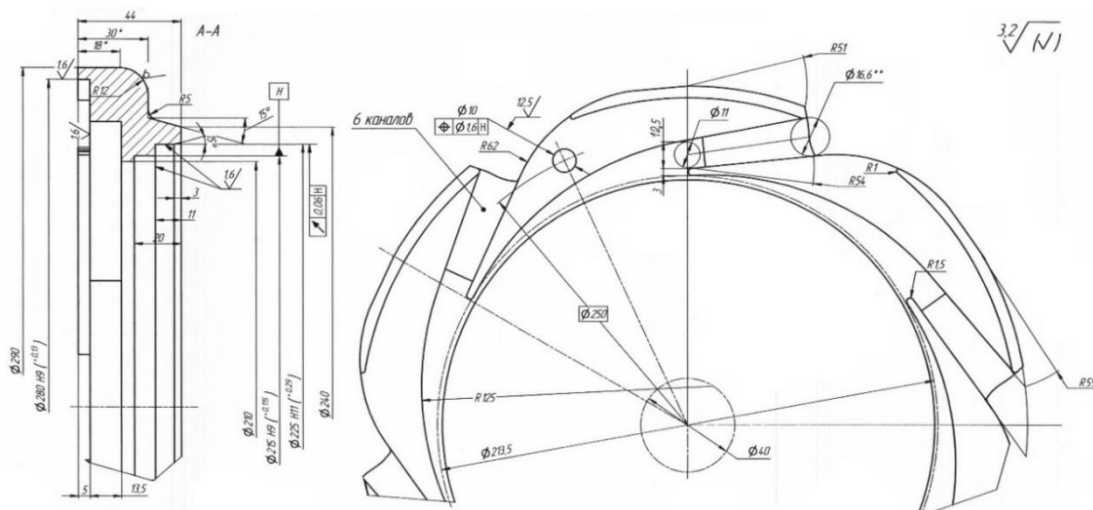


Рис. 4. Фрагмент креслення АС з розмірами каналів

Джерело: розроблено авторами.

Для забезпечення можливості обробки всіх каналів АС за один установ має бути здійснений безперешкодний доступ до всіх оброблюваних поверхонь. Це може забезпечуватись за рахунок схеми базування (рис. 5). При цьому виникає установка база по торцю  $\phi 213H9/\phi 209^*$  і подвійна опорна база по циліндричній поверхні  $\phi 213H9$  на всю її довжину. Закріплення відбуватиметься одночасно по всім точкам внутрішнього циліндра  $\phi 213H9$  на розтискання за рахунок використання цанги спеціальної конструкції.

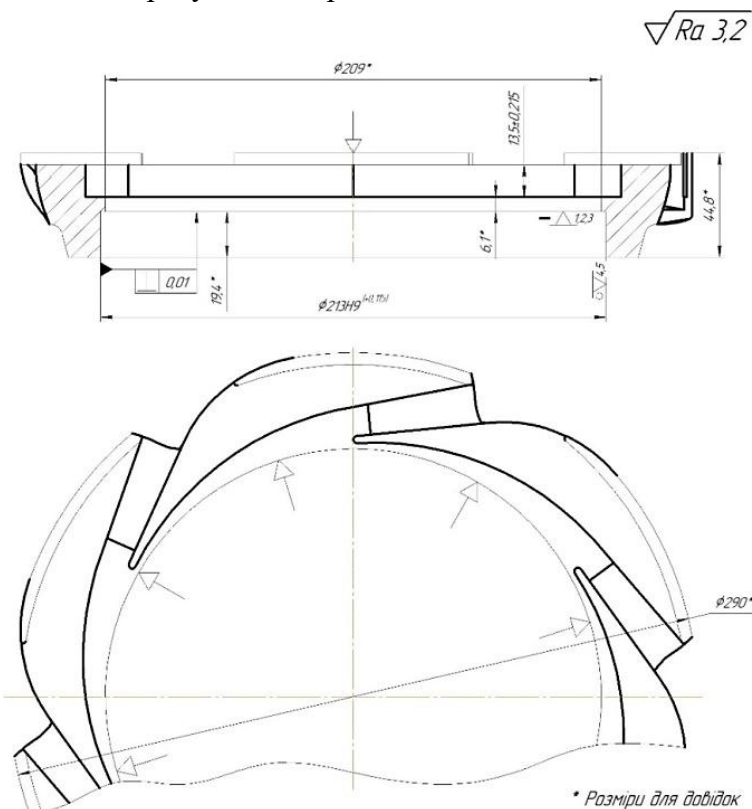


Рис. 5. Теоретична схема установки заготовки АС

Джерело: розроблено авторами.



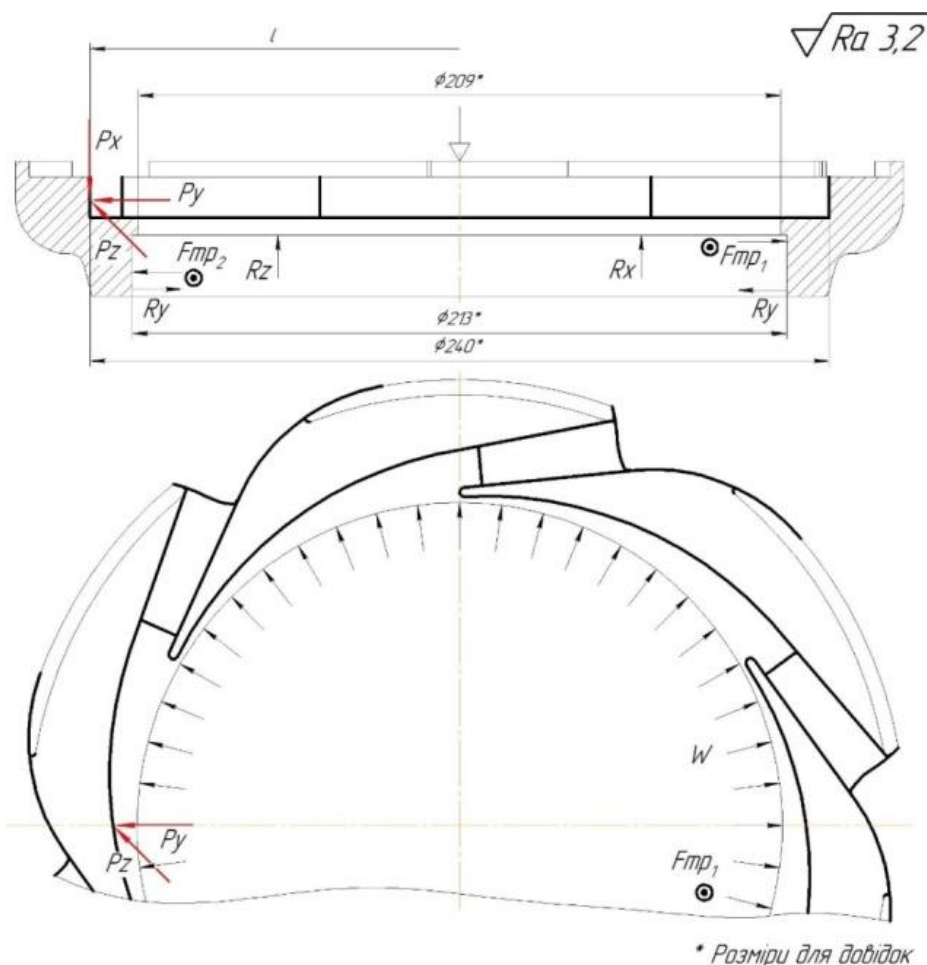


Рис. 6. Розрахункова схема визначення величини осьової сили закріплення  
Джерело: розроблено авторами

У зв'язку з тим, що закріплення у нас відбувається за внутрішню поверхню Ø213, то рух АС буде обмежуватись лише силами тертя і, власне, перешкоджати його зрушенню силами різання лише за рахунок сил тертя, то для розрахунку необхідної сили в контактній взаємодії «циліндрична поверхня – пелюстки цангової оправки» необхідно розрахувати величину докладання осьового зусилля, яке буде спричинятися шляхом втиснення конуса в цангову частину оправки. Для цього була розроблена розрахункова схема дії сил різання і сил опору (сил закріплення) для цієї схеми обробки.

З рис. 6 складаємо рівняння сил та моментів і визначаємо силу  $W$ .

$$W = \frac{K \times l \times P_y}{f \times \left( \left( R_1 + \frac{209}{2} \right) + \left( R_2 + \frac{213}{2} \right) \right)} = 2509 \text{ Н}, \tag{1}$$

де  $K$  – коефіцієнт запасу для заданих умов обробки та режимів різання [20];

$l = 120$  мм – плече дії сили  $P_y$ ;

$P_y = 682$  Н – складова сили різання;

$f = 0,25$  – коефіцієнт тертя по поверхнях оправка-цанга – заготовка;

$R_1 = 106,5$  мм – радіус циліндричної поверхні оправки-цанги;

$R_2 = 104,5$  мм – менший радіус торця оправки-цанги.

На основі теоретичної схеми встановлення для можливості виконання чисельного моделювання з метою перевірки сталості закріплення та визначення точності обробки в статичному режимі розробимо 3D модель конструкції ВП.



Далі на основі цього концепту була спроектована 3D-модель ВП (рис. 7). Механізм затиску для попередніх розрахунків обираємо гвинтовий, що дозволить затискати апарат швидко та надійно, при цьому допоміжний час складе 1,5 хвилини [19]. Але механізм затиску також може бути реалізований різними способами – пневмо, гідро, електро – що не є принциповим у контексті цього дослідження. Конструкція самих установчих та затискних елементів ВП повинна забезпечувати необхідну жорсткість, відповідно мінімальні вібрації, точність обробки, яка має відповідати допускам на рис. 4.

Для цього треба виконати чисельне моделювання розробленої конструкції ВП. З метою скорочення часу на розрахунки усі елементи моделі при побудові були максимально спрощені.

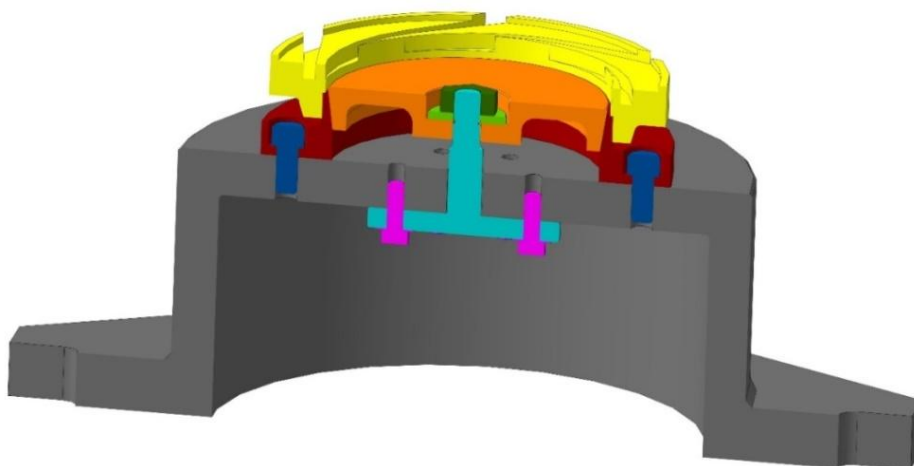


Рис. 7. 3D-модель ВП для чисельного моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Саме така конструкція корпусу ВП вибрана для того, щоб ми могли мати можливість встановлення механізованого приводу будь-якого типу, а також перспективу розширення номенклатури оброблюваних деталей подібної форми в значно більшому діапазоні розмірів з мінімальними затратами шляхом заміни установчих елементів, а саме оправки цангової і притискного конуса.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) виконуємо для тих деталей ВП, які будуть безпосередньо впливати на показники міцності та точності при обробці деталі. На цьому етапі дослідження перевіряються еквівалентні напруження, що виникають у місцях контакту заготовки та установлювально-затискних елементів як результат дії сил закріплення та дії моментів та сил в процесі різання, а також умови за допустимими напруженнями для деталей із конкретних матеріалів.

Для виконання розрахунків використовуємо ANSYS Workbench. Під час дослідження визначаємо частоти власних коливань і порівнюємо з частотами, що можуть виникнути в процесі різання при обробленні заготовки. Ці результати допоможуть нам зрозуміти чи правильно розроблена конструкція ВП та за необхідності удосконалити її, для того щоб підвищити точність та запобігти явищу резонансу. Оскільки всі деталі розробленого ВП виготовляються зі сталі 45, то механічні властивості матеріалу, який використовується у моделі, взяті аналогічно як і в дослідженні [20]. Матеріалом заготовки АС є сталь 20X13 ДСТУ 5632-2016, механічні властивості якого також задавались у програмі.

У табл. 1 наведена розрахункова схема прикладення навантажень на систему «ВП – заготовка» у програмі ANSYS.

Таблиця 1 – Групи з'єднань контактних пар досліджуваного ВП

ВП і схема розташування контактів				
Базова поверхня / тип закріплення	Параметри реалізованих груп з'єднань			
	Контакт	Поверхні, що контактують	Вид поверхонь, що контактують	Коефіцієнт тертя $f$
Нижня площина / fixture support	1	Конічна поверхня притискного фланця / конічна поверхня цанги	гладкі / гладкі	0,1
	2	Циліндрична поверхня цанги / базовий отвір заготовки	гладкі / гладкі	0,1
	3	Торцева поверхня цанги / базовий торець заготовки	гладкі / гладкі	0,1

Джерело: розроблено авторами.

Для виключення будь-яких можливих переміщень обов'язковою умовою під час моделювання було закріплення ВП за нижню поверхню основи корпусу ВП, що імітує фіксацію на столі вертикально-фрезерного з ЧПК верстата, а також об'єднано всі поверхні між собою з типом контактів «Bonded». У місцях посадок задані контакти типу «Frictional» із зазначенням параметрів тертя та врахуванням технічних характеристик кожної з них (табл. 1). Це зроблено для чіткішого відображення деформацій, що можуть виникнути в процесі обробки та для отримання більш точних результатів.

**Результати дослідження.**

У результаті моделювання було отримано графічні дані по розподілу максимальних напружень (рис. 8, а) та переміщень (рис. 8, б).

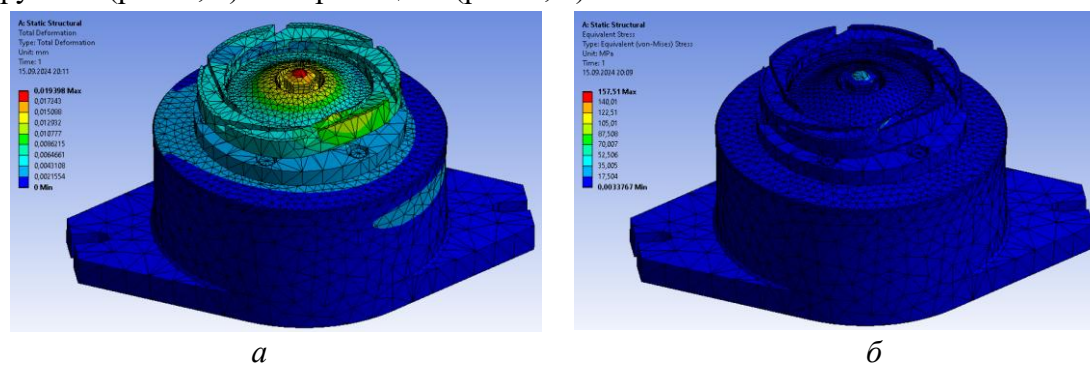


Рис. 8. Ілюстрація розподілу:

а – максимальних напружень і б – максимальних переміщень

Джерело: розроблено авторами.

Для більш точного аналізу характеру переміщень елементів системи «ВП – заготовка» за осями координат на рис. 9 частково представлені ілюстрації переміщень, які виникають при закріпленні та фрезеруванні заготовки. При цьому переміщення за віссю X становлять 0,00002 мм, що є дуже малим значенням у порівнянні з допуском на обробку та величинами переміщень за іншими двома осями, тому вони не показані.

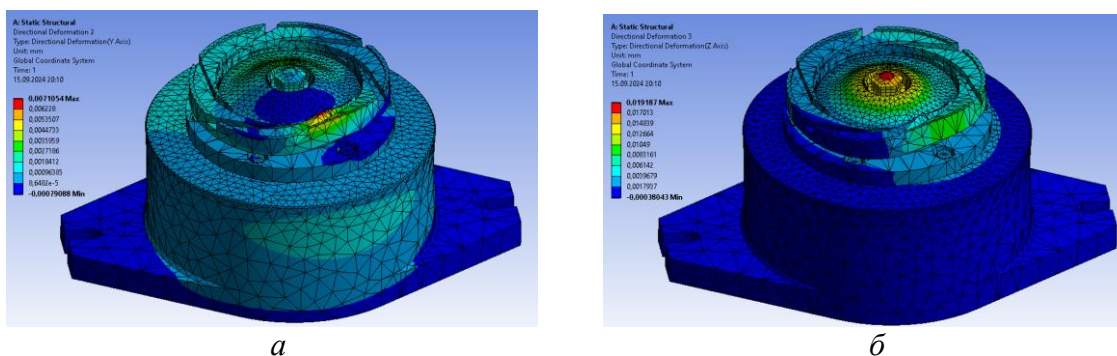


Рис. 9. Деформації по осях:  
а – по осі Y і б – по осі Z

Джерело: розроблено авторами.

Проаналізувавши отримані результати величин напружень та переміщень, можна зробити висновок, що розроблений ВП буде працездатним під час реального експерименту та точність обробки буде забезпечена. Отримані при аналізі значення переміщень не виходять за межі допусків, оскільки найбільш точний розмір на даній операції – ширина каналу в найтоншому його місці становить 12,5 (+0,43; 0) мм, а загальні деформації не перевищують 0,02 мм. Враховуючи це, допустимий запас за величиною переміщень складає 0,41 мм, що, безумовно, необхідно, адже інші складові похибок обробки також будуть впливати на точність. Максимальні напруження під час чисельного моделювання показали 158 МПа, що менше допустимих для матеріалів деталей ВП. При цьому ці напруження виникають на різьбовій ділянці штока, для якого була задана сила затяжки 10 000 Н, що в 4 рази перевищує силу затиску W, розраховану за схемою.

Для перевірки роботи ВП на розрахункових режимах різання з погляду опору частотам коливання, що при цьому виникають за допомогою функції Modal Analysys, що вбудований у програмному комплексі ANSYS визначено частоти його власних коливань. Дані значення частот було порівняно з частотами, які виникають у процесі механічної обробки, що за потреби дозволить здійснити оброблення на інших режимах, щоб запобігти резонансу. На рис. 10 зображені три перших форми власних коливань досліджуваної системи «ВП – заготовка».

Отримані значення величини коливань за результатами інженерного дослідження частот (мод) становлять 1488, 1525 та 1659 Гц для першої, другої та третьої критичних частот відповідно.

Враховуючи, що на даній операції максимальна частота процесу різання не перевищує 141 Гц, то з впевненістю можна сказати, що при обробці явище резонансу виникати не буде, позаяк вона значно менша за значення моди № 1.

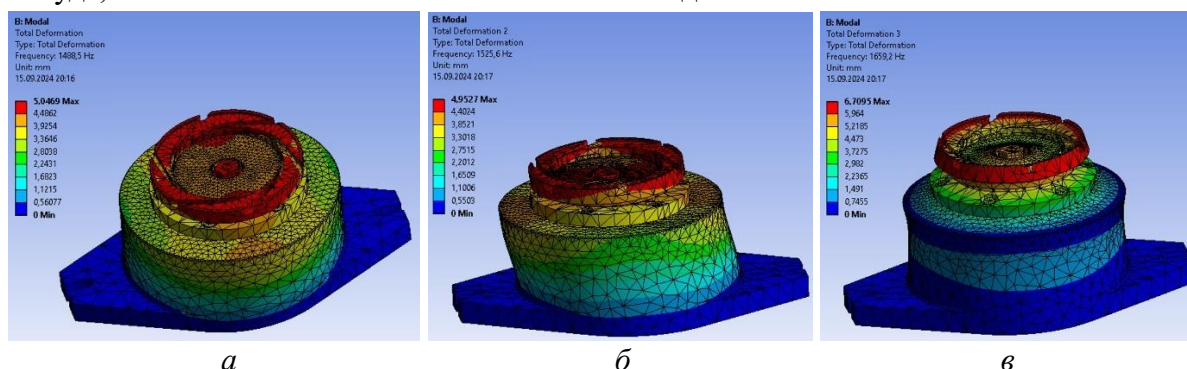


Рис. 10. Ілюстрації критичних частот коливань ВП:  
а – першої; б – другої; в – третьої

Джерело: розроблено авторами.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що перша критична частота власних коливань ВП суттєво перевищує максимальну частоту процесу різання, а це значить, що явище резонансу не виникне для запропонованої конструкції ВП.

За результатами модального аналізу можна припустити, що в реальних умовах динамічна жорсткість спроектованого ВП буде достатньою для виконання механічного оброблення без виникнення явища резонансу, що і буде перевірено в наступних дослідженнях.

**Висновки.** У результаті роботи було розроблено конструкцію ВП для оброблення каналів АС за один установ та доведено його працездатність шляхом порівняння отриманих результатів чисельного моделювання з допустимими значеннями параметрів оброблення. Теоретично доведено, що величини напружень в елементах конструкції ВП значно менші за допустимі значення характеристик матеріалів системи «ВП – заготовка», а переміщення не перевищують значення допуску на ширину каналу. При цьому коефіцієнт запасу за напруженнями становить 3,8, а загальні деформації не перевищують 0,02 мм, що суттєво менше за допуск. Величини переміщень за осями координат, вздовж яких було прикладене навантаження, також не перевищують заданих конструктором значень.

Вперше теоретично доведено, що конструкція розробленого ВП для фрезерування каналів АС з використанням принципу затиску із розтискною цангою та притискним фланцем за внутрішню циліндричну поверхню АС, що забезпечує повну інструментальну доступність для обробки, здатна забезпечувати необхідну точність оброблення при статичному навантаженні, адже величини переміщень не перевищують допустимих значень.

Встановлено, що допустимий запас по переміщеннях становить 0,41 мм, а отже, залишається певний запас на можливі похибки, що виникають під час оброблення.

Теоретично доведено, що резонансу під час оброблення не виникне, адже перша критична частота коливань розробленої конструкції в 10,5 раза перевищує частоту процесу різання, що в перспективі дозволить застосовувати більш продуктивні режими оброблення і ВП не буде найслабшою ланкою в технологічній системі.

Встановлено, що розроблена конструкція ВП дозволяє скоротити допоміжний час на базування та закріплення з 12 хвилин до 1,5 хвилини, або ж у 8 разів, що дозволить підвищити ефективність обробки в реальному виробництві.

Отримані результати вказують на потенційні можливості застосування ВП з використанням принципу затиску із розтискною цангою за внутрішню циліндричну поверхню АС при обробці за одне встановлення та загалом про доцільність проектування ВП, заснованих на подібному принципі для інших класів деталей, що мають короткий циліндричний отвір великого діаметру та малу жорсткість. Тому подальші дослідження будуть спрямовані на експериментальне підтвердження теоретичних даних під час здійснення процесу оброблення.

### Список використаних джерел

1. Колесник, В. А. Прогнозирование микрорельефа обработанной резанием поверхности волокнистых полимерных композиционных материалов / В. А. Колесник; рук. Д. В. Криворучко // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 23-26 квітня 2013 р. : у 2-х ч. / ред. кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2013. – Ч. 1. – С. 23.
2. Яковенко, І. Е. Технологічні основи машинобудування : навч. посібник / І. Е. Яковенко, О. А. Пермяков, А. В. Фесенко ; Нац. техн. ун-т «Харків. політех. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – 421 с.
3. Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафеев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.
4. Загальнопромислові відцентрові насоси - замовити в Dalgakiran [Електронний ресурс] // DALGAKIRAN - промислове обладнання в Києві. Далгакіран - офіційний сайт представництва в Україні. – Режим доступу: <https://dalgakiran.ua/uk/products/vidcentrovi-nasosy-zagalnogo-zastosuvannya>.

5. Відцентровані Насоси Ціна (2024) Купити в Україні [Електронний ресурс] // Промислові Насоси + Обладнання (2024) купити в Україні - Аско Пампс. – Режим доступу: <https://ascopumps.com.ua/ua/pumps/tsentrobezhye.html>.
6. ДСТУ 3063-95. Насоси. Класифікація. Терміни та визначення. – [Чинний від 1995-04-21]. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 47 с.
7. ДСТУ 4132-2002 Насоси відцентрові загальнопромислового застосування. Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажування та експлуатування. Звід правил / розроб. О. Швідін [та ін.]. – Вид. офіц. – [Чинний від 01.01.2004]. – Київ : Держстандарт України, 2003. – III, 27 с. – (Національний стандарт України).
8. ISO 2858:1975. End-suction centrifugal pumps (rating 16 bar) – Designation, nominal duty point and dimensions.
9. ISO 9908:1993. Technical specifications for centrifugal pumps — Class III.
10. Centrifugal pumps transporting operations of food materials within food factories / Z. Mohammedi, F. Heidari, M. Fasamanesh, A. Saghafian, F. Amini, S. M. Jafari // In Unit operations and processing equipment in the food industry. – 2023. – Pp. 155-200. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818585-8.00006-4>.
11. Jigs and fixtures in production: A systematic literature review / F. Fiedler, J. Ehrenstein, C. Hölting, A. Blöndrath, L. Schäper, A. Göppert, R. Schmitt // Journal of Manufacturing Systems. – 2024. – № 72. – Pp. 373-405. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.01.015>.
12. Advances in design, simulation and manufacturing / V. Ivanov, Y. Rong, J. Trojanowska, J. Venus, O. Liaposhchenko, J. Zajac, et al. // Cham: Springer International Publishing. – 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23064-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23064-7_6).
13. Ivanov, V. Flexible fixtures for CNC machining centers in multiproduct manufacturing / V. Ivanov, J. Zajac // EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems. – 2018. – № 4(12). – Pp. 153552. DOI: <https://doi.org/10.4108/eai.10-1-2018.153552>.
14. Kamble, V. D. Brief review of methodologies for creation of cohesive fixture design / V. D. Kamble, A. T. Mathew // Materials Today: Proceedings. – 2020. – № 22(4). – Pp. 3353-3363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.530>.
15. Li, H. Design and application of flexible fixture / H. Li, W. Chen, S. Shi // Procedia CIRP. – 2016. – № 56. – P. 528-532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.042>.
16. Design for automation: The rapid fixture approach / R. Förstmann, J. Wagner, K. Kreisköther, A. Kampker, D. Busch // Procedia Manufacturing. – 2017. – № 11. – Pp. 633-640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.093>.
17. Do, M. D. Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components / M. D. Do, Y. Son, H.-J. Choi // Computer-Aided Design. – 2018. – № 95. – Pp. 14-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.10.003>.
18. Пат. 149174 U Україна, МПК (2021.01) B23В 39/00. Переналаджуваний верстатний пристрій для оброблення деталей типу шатуни [Електронний ресурс] / І. М. Дегтярьов, В. О. Іванов, І. О. Косов та ін. (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. - № u202103241; заявл. 10.06.2021; опубл. 20.10.2021, бюл. № 42. – Режим доступу: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/89543/1/149174\\_Dehtiarov.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/89543/1/149174_Dehtiarov.pdf).
19. Selected aspects of precision machining on CNC machine tools / J. Peterka, M. Kuruc, V. Kolesnyk, I. Dehtiarov, J. Moravcikova, T. Vopat, P. Pokorny, F. Jurina, V. Simna // Machines. – 2023. – № 11. – Pp. 946. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11100946>.
20. Плис, В. С. Удосконалення технологічного процесу виготовлення апарата, що направляє, НЗ2.1300.007-03 шляхом інтенсифікації оброблення каналів на вертикально-фрезерній з ЧПК операції : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 131 - прикладна механіка / В. С. Плис; наук. кер. І. М. Дегтярьов. – Суми : Сумський державний університет, 2023. – 60 с. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/93926>.

## References

1. Kolesnyk, V. A. (2013). Prohnozirovanie mikrorel'efa obrabotannoi rezaniem poverkhnosti voloknystykh polimernykh kompozitsionnykh materialov [Forecasting the microrelief of the machined surface of fibrous polymer composite materials]. In D. V. Kryvoruchko (Ed.), *Suchasni tekhnologii u promyslovomu vyrobnytstvi: materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii vykladachiv, spivrobotnykiv, aspirantiv i studentiv faktu tekhnichnykh system ta enerhoefektyvnykh tekhnologii – Modern technologies in industrial production: Proceedings of the scientific and technical conference* (Vol. 1, p. 23). SumDU.



2. Yakovenko, I.E., Permyakov, O.A., & Fesenko, A.V. (2022). *Tekhnolohichni osnovy mashynobuduvannia [Technological foundations of machine engineering]*. NTU "KhPI".
3. Dobryansky, S.S., & Malafeev, Y.M. (2020). *Tekhnolohichni osnovy mashynobuduvannia [Technological foundations of machine engineering]*. KPI named after Igor Sikorsky.
4. Dalgakiran Compressor Ukraine LLC. (n.d.). Zahalnopromyslovi vidtsentrovni nasosy - zamovyty v Dalgakiran [Centrifugal pumps for general use]. <https://dalgakiran.ua/uk/products/vidcentrovi-nasosy-zagalnogo-zastosuvannya>.
5. ASKO PUMPS LLC. (n.d.). Vidtsentrovani Nasosy [Centrifugal pumps]. <https://ascopumps.com.ua/ua/pumps/tsentrobezhye.html>.
6. DSTU 3063-95. (1995). Nasosy. Klasyfikatsiia. Terminy ta vyznachennia [Pumps. Classification. Terms and definitions].
7. DSTU 4132-2002. (2002). Nasosy vidtsentrovni zahalnopromysloвого zastosuvannia. Vymohy do proektuvannia, vyhotovliannia, postachannia, montazhuvannia ta ekspluatuvannia. Zvid pravyl [Centrifugal pumps for general industrial use. Requirements for design, manufacture, supply, installation, and operation. Code of rules].
8. ISO 2858:1975. End-suction centrifugal pumps (rating 16 bar) — Designation, nominal duty point and dimensions.
9. ISO 9908:1993. Technical specifications for centrifugal pumps — Class III.
10. Mohammadi, Z., Heidari, F., Fasamanesh, M., Saghafian, A., Amini, F., & Jafari, S. M. (2023). Centrifugal pumps transporting operations of food materials within food factories. In *Unit operations and processing equipment in the food industry* (pp. 155-200). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818585-8.00006-4>.
11. Fiedler, F., Ehrenstein, J., Hölting, C., Blondrath, A., Schäper, L., Göppert, A., & Schmitt, R. (2024). Jigs and fixtures in production: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 373-405. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.01.015>.
12. Ivanov, V., Rong, Y., Trojanowska, J., Venus, J., Liaposhchenko, O., Zajac, J., et al. (2019). *Advances in design, simulation and manufacturing*. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23064-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23064-7_6).
13. Ivanov, V., & Zajac, J. (2018). Flexible fixtures for CNC machining centers in multiproduct manufacturing. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 4(12), Article 153552. <https://doi.org/10.4108/eai.10-1-2018.153552>.
14. Kamble, V.D., & Mathew, A.T. (2020). Brief review of methodologies for creation of cohesive fixture design. *Materials Today: Proceedings*, 22(4), 3353-3363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.530>.
15. Li, H., Chen, W., & Shi, S. (2016). Design and application of flexible fixture. *Procedia CIRP*, 56, 528-532. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.042>.
16. Förstmann, R., Wagner, J., Kreisköther, K., Kampker, A., & Busch, D. (2017). Design for automation: The rapid fixture approach. *Procedia Manufacturing*, 11, 633-640. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.093>.
17. Do, M. D., Son, Y., & Choi, H.-J. (2018). Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components. *Computer-Aided Design*, 95, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.10.003>.
18. Dehtiarov, I.M., Ivanov, V.O., Kosov, I.O., Lobov, Y.S., Pavlenko, I.V., & Parfentsev, I.S. (2021). Perenalahodzhuvanyi verstatnyi prystrii dlia obrobлення detalei typu shatuny [Reconfigurable machining device for processing crankshaft-type parts] (Ukrainian patent No. 149174). State Intellectual Property Office of Ukraine. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278691>.
19. Peterka, J., Kuruc, M., Kolesnyk, V., Dehtiarov, I., Moravcikova, J., Vopat, T., Pokorny, P., Jurina, F., & Simna, V. (2023). Selected aspects of precision machining on CNC machine tools. *Machines*, 11, 946. <https://doi.org/10.3390/machines11100946>.
20. Plys, V.S. (2023). Udoskonalennia tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia aparata, shcho napravliaie, N32.1300.007-03 shliakhom intensyfikatsii obrobлення kanaliv na vertykalno-frezernii z ChPK operatsii [Improvement of the technological process for manufacturing the directing apparatus, N32.1300.007-03 by intensifying the processing of channels on a vertical milling machine with CNC operations] [Master's thesis in specialty 131 - applied mechanics]. Sumy State University. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/93926>.

UDC 621.9.1

**Viktor Plys<sup>1</sup>, Ivan Dehtiarov<sup>2</sup>, Anna Neshta<sup>3</sup>, Olexandr Metenko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD student, Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
**E-mail:** [v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-1635-3839>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
**E-mail:** [ivan\\_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:ivan_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8535-987X>  
**Scopus Author ID:** [57192084069](https://orcid.org/0000-0001-8535-987X)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
**E-mail:** [anna\\_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:anna_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4072-5439>  
**Scopus Author ID:** [55884734500](https://orcid.org/0000-0003-4072-5439)

<sup>4</sup>Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
**E-mail:** [sashamet14@gmail.com](mailto:sashamet14@gmail.com)

## THE DEVELOPMENT OF THE FIXTURE DESIGN FOR GUIDING APPARATUS CHANNELS MACHINING OF CENTRIFUGAL PUMPS

*The use of modern metal cutting machines with wide technological capabilities, the active development of multi-nomenclature productions and the demands of the modern market make it necessary to increase the efficiency of mechanical processing of parts with a complex configuration and low rigidity.*

*Typical methods and approaches to the design of fixtures do not always provide the opportunity to perform machining in one setup with high-performance cutting conditions when processing thin-walled parts with a small area of fixing surfaces, so it is necessary to move to new approaches that allow to realize maximum tool availability and increase productivity as per both in the machining and in auxiliary time.*

*Analysis of the latest research and publications on the design and numerical modeling of fixtures for machining thin-walled parts with a geometrically complex profile and low stiffness showed that insufficient attention has been paid to the research of stresses and movements in the "fixture-workpiece" system, especially for parts of the type of guiding apparatus in scientific literature. More specifically, there is no information on ensuring stability and reliability of fixation in the fixture with minimal deformations and maximum instrumental accessibility.*

*The purpose of the article is to develop the design of the fixture for machining the channels of the guiding apparatus for one setup and to prove its efficiency using numerical simulation.*

*The work presents for the first time a developed fixture for milling the channels of guiding apparatus using the principle of clamping with a compression collet for the inner cylindrical surface and carried out studies of its stress-strain state in a static mode by numerical modeling methods. The determined values of stresses and displacements preliminarily showed its efficiency according to indicators of bearing capacity for loads acting during machining and obtaining the required accuracy specified by the designer.*

*The presented results of the stress-strain state and natural oscillation frequencies of the developed fixture can be used for its manufacture and further research directly during machining.*

**Keywords:** accuracy; numerical simulation; methodology; rigidity; deviation; error; resonance; stress; deformation; location.  
**Table:** 1. **Fig.:** 10. **References:** 20.