

**Іван Дегтярьов<sup>1</sup>, Анна Нешта<sup>2</sup>, Ілля Косов<sup>3</sup>, Ярослав Клок<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, старший викладач 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](https://orcid.org/0000-0001-8535-987X)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, 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](https://orcid.org/0000-0003-4072-5439)

<sup>3</sup>аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [ilyakosov95@gmail.com](mailto:ilyakosov95@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6472-6554>

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

E-mail: [yarikklok11@gmail.com](mailto:yarikklok11@gmail.com)

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ З НЕПОВНИМ БАЗУВАННЯМ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ШАТУНІВ**

*На основі застосування нових підходів до базування деталей та технологічних можливостей сучасних металорізальних верстатів запропоновано нові конструктивні рішення верстатного пристрою для встановлення деталей типу шатунів на багатоцільових верстатах. Уперше експериментально визначена статична жорсткість верстатного пристрою такого типу для оброблення шатунів. Виконано чисельне моделювання напружено-деформованого стану запропонованої конструкції та зіставленні теоретичні та експериментальні значення величин переміщень оброблюваних поверхонь у верстатному пристрої під дією зовнішніх навантажень.*

**Ключові слова:** точність; відхилення; напруження; чисельне моделювання; похибка.

Табл.: 3. Рис.: 9. Бібл.: 15.

**Актуальність теми дослідження.** Активний розвиток виробничих технологій, зумовлений як вимогами концепції Індустрії 4.0, так і світовими потребами суспільства у збільшенні кількості якісної та доступної продукції для широкого кола людей, вимагає від машинобудівних виробництв впровадження сучасних технологій вже зараз [1]. У зв'язку з вищезазначеним підприємствам для можливості виготовлення конкурентоспроможної продукції необхідно постійно оновлювати не тільки обладнання, технології виготовлення, а й підходи до виробничого процесу. Номенклатура автомобілів та іншої техніки, що містить двигуни внутрішнього згорання – трактори, мотоцикли, катери, дрібна сільськогосподарська та інша техніка, постійно зростає. При цьому час виходу продукції на ринок скорочується, оновлюються моделі, змінюються технічні характеристики.

Також змінився підхід до виготовлення запасних частин до вищевказаної техніки. Їх здебільшого виготовляють підприємства підрядники за ліцензією або договорами, реалізуючи таким чином концепцію оццадливого виробництва [2; 3]. Але це треба робити досить швидко і при цьому якісно, причому обсяги партій та номенклатура деталей можуть суттєво відрізнятись.

Класичний підхід вимагає великої кількості спеціального оснащення для кожного конкретного типорозміру деталі, що в сучасних умовах є економічно недоцільним. Тому розроблення нових технічних рішень переналагоджуваних верстатних пристроїв (ВП) є актуальним завданням.

**Постановка проблеми.** Верстатний парк на підприємствах підрядниках досить різноманітний із широкими технологічними можливостями, проте переважно використовуються універсальні багатокординатні обробні центри з можливостями для високоточного та високопродуктивного оброблення. Форма організації виробництва на таких підприємствах здебільшого дрібносерійна з меншим або більшим направленням на збільшення серійності відповідно до економічних, технічних, територіальних та інших особливостей.

Загалом продукція машинобудівних виробництв досить різноманітна, але в цій статті акцент буде зосереджено на виготовленні таких запасних частин, як нерознімні шатуни, що застосовуються в поршневих компресорах та двигунах мотоциклів і великого різноманіття техніки для сільськогосподарських та домашніх потреб, що містить у своєму складі двигуни внутрішнього згоряння. Оскільки нині виробники постійно оновлюють свої моделі не тільки зовнішньо, але й технічно, то деталі у двох схожих за характеристиками агрегатів навіть однієї фірми відрізняються і не є взаємозамінними. Запасні частини до вищевказаної техніки виготовляють в обмеженій кількості під час основного циклу випуску моделі, а після зняття моделі з виробництва виготовлення комплектуючих до неї визначається потребами сервісних центрів та ринку, тому обсяги партій, що замовляються на підприємствах підрядниках, коливаються досить суттєво.

Деталі типу шатуни, що розглядатимуться в дослідженні, належать до некруглих стрижнів за класифікатором ЄСКД, клас 72 [4]. Така геометрична форма викликає складність базування, а наявність великої кількості необроблених поверхонь, у сукупності з достатньо високими вимогами до розмірної точності, точності форми та взаємного розміщення поверхонь шатунів, у великосерійному та масовому виробництві вимагало застосування виключно спеціальних ВП. Причому для особливо відповідальних конструкцій використовувались «пристрої супутники», щоб не виконувати повторне установлення деталі, бо накоплюється велика похибка через конструктивну неможливість повністю відмовитися від чорнових баз після першої механічної операції. Тому заготовка знаходилась у «пристрою супутнику» на певному етапі або взагалі протягом всього технологічного процесу механічного оброблення. Відповідно процес переналагодження займав досить багато часу і таких пристроїв потрібно було використовувати декілька одночасно при такому підході, що передбачав диференціацію операцій за видом обладнання, через його вузьконаправленість та обмежені технологічні можливості. Усе це недопустимо в умовах сучасної конкуренції в машинобудівній галузі.

Нині технологічні можливості обробних центрів зробили великий технологічний крок і дозволяють виконувати оброблення кожної наступної деталі без точного її попереднього базування. Вимірювальний щуп визначає координати фактичного положення заготовки відносно системи координат верстата і система ЧПК в автоматичному циклі коригує траєкторію руху інструмента, враховуючи реальне положення оброблених поверхонь заготовки в цьому конкретному випадку. Це дозволяє дещо спростити схеми базування заготовок і відповідно виключити похибки установлення, але виникає необхідність за рахунок сил закріплення надати заготовці незмінного положення протягом усього процесу оброблення.

Тому зусилля конструкторів технологічного оснащення мають бути спрямовані на проектування ВП, які будуть забезпечувати достатню інструментальну доступність для можливості реалізації оброблення за мінімальну кількість установлень. Також ВП мають бути достатньо жорсткими для забезпечення максимальної реалізації можливостей сучасних верстатів та різальних інструментів, при цьому дозволяти установлення деталей у максимально можливому діапазоні розмірів згідно з конструктивними характеристиками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загалом питанням підвищення продуктивності на невеликих підприємствах із дрібносерійною формою організації виробництва займаються не тільки в галузі металооброблення, але й у інших галузях машинобудування, зокрема у [5] авторами статті запропоновані шляхи підвищення продуктивності за рахунок застосування підходів до ефективного компонування цеху та принципово нових конструкцій пристроїв для базування труб при зварюванні, що в сукупності дозволило скоротити виробничі витрати на 15 %. Питаннями проектування та розрахунку ВП займалися багато вчених по всьому світу. Зокрема у [6] розроблено алгоритм автоматизованого проектування ВП на

основі оптимізації вибору варіантів закріплення на прикладі лопатки реактивного двигуна, що має складну геометричну форму і малу власну жорсткість. Корес та Kowalewska у роботі [7] запропонували ВП для підвищення жорсткості тонкостінних композиційних листів під час оброблення та фізико-механічних випробувань на циклічну міцність.

У роботі [8] авторами пропонується метод оцінки частотних характеристик заготовки з пристосуванням та автоматизований алгоритм визначення оптимального розташування допоміжних опор ВП під час фрезерування деталей малої жорсткості з тонкостінного листового матеріалу. Важлива оптимізаційна задача з визначення оптимальної схеми закріплення у переналагоджуваних ВП для заготовок різного типу розглянута в роботі [9], де при автоматизованому проєктуванні враховуються кінематичні параметри ВП і заготовки. В роботі також проведені експериментальні дослідження, які довели ефективність схем закріплення, що отримані методами автоматизованих обчислень та задовольняють різним обмеженням, які зазвичай накладаються в реальних виробничих умовах.

Цікавим питанням оптимізації конструкцій ВП та схеми закріплення для заготовок зі змінною жорсткістю з метою підвищення якості та забезпечення сталості оброблення на всіх її поверхнях займалися Li G. та ін. у [10], де автори запропонували статичну модель сили різання для отримання мінімальної сили затиску, необхідної для підтримки стабільності закріплення та розділили заготовку на зони жорсткості, що в сукупності з генетичним алгоритмом дозволило зменшити похибки форми та підвищити якість поверхні при торцевому фрезеруванні на 9 %, що підтверджено експериментально.

Chai S. та ін. у [11] запропонували нову конструкцію допоміжної опори для підвищення жорсткості та контролю деформацій з адаптивною зміною сили опору в залежності від дії зовнішніх сил для тонкостінних корпусних деталей. Експериментальні дослідження показали ефективно зменшення вібрацій та стабілізацію якості поверхні.

У [12] запропоновано конструкцію модульного пристрою зі змінною жорсткістю для операції чорнового фрезерування, принцип якого полягає в автоматизованому керуванні жорсткістю поворотної пружини вихровими токами. Також експериментальними дослідженнями статичної та динамічної жорсткості під впливом зовнішніх вертикальних сил та моментів займалися J. Abou-Hanna та ін., що відображено у [13], де результати досліджень представлені у вигляді залежностей деформацій поверхонь заготовки від глибини різання, сили закріплення та поперечного перерізу заготовки.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питаннями експериментальних досліджень та підвищенням жорсткості при обробленні деталей малої або змінної жорсткості займалися багато науковців, але ними не розглядалися типи ВП з неповним базуванням, де силам різання на певних напрямках протидіють лише сили закріплення. Також не виконувалось експериментальні дослідження ВП саме для оброблення деталей типу нерознімних шатунів за одне установлення при неповному базуванні й закріпленні по необроблюваним поверхням.

**Метою статті** є експериментальне доведення можливості оброблення нерознімних шатунів у ВП з неповним базуванням та закріпленням лише по необроблюваним поверхням за одне установлення із досягненням усіх необхідних показників розмірної точності.

**Виклад основного матеріалу.** Шатун є основним елементом будь-якого кривошипно-шатунного механізму та використовуються в усіх класичних компоновках двигунів внутрішнього згоряння. Шатун являє собою зв'язуючу деталь між поршнем, що рухається поступально, та колінчастим валом, що здійснює обертальний рух. Сучасні двигуни внутрішнього згоряння мають суттєво більшу потужність ніж двигуни аналогічного робочого об'єму, виготовлені 20-30 років тому. В основному підвищення потужності досягається шляхом підвищення частоти обертання колінчастого вала двигуна, наявністю нагнітача повітря у вигляді турбокомпресора чи турбіни та збільшення ступеня стиснення. Всі ці підвищені навантаження, що надходять із камери згоряння через рух поршня за допомогою шатуна передаються на колінчастий вал.

Об'єктом дослідження обрано деталі типу шатуни. Шатуни мають досить різноманітну конструкцію залежно від службового призначення виробу/машини, де працює шатун. Проте з усіх конструкцій шатунів у цій роботі будемо розглядати найбільш прості з погляду технології оброблення нерознімні шатуни, деякі варіанти конструкції яких представлені на рис. 1.



*Рис. 1. Конструкції нерознімних шатунів:*

*а – мотоцикла Yamaha RD400; б – легкого скутера Alpha 125cc;  
в – мотоцикла Suzuki RMX450Z; г – скутера Piaggio Carnaby 200*

Джерело: <https://moto-max.com.ua>.

Нерознімні шатуни переважно використовуються у двигунах мотоциклів, скутерів, мопедів, бензопил та іншої невеликої техніки мототехніки.

Усі отвори та площини шатунів пов'язані між собою вимогами до міжцентрових відстаней між ними, паралельності осей, та вимогами до просторового положення плоских поверхонь одна відносно іншої. Через широку розповсюженість нерознімних шатунів у негабаритних двигунах внутрішнього згоряння підвищення продуктивності їх оброблення є актуальним завданням. Нерознімні шатуни, на відміну від рознімних, являють собою одну деталь протягом усього ТП їх виготовлення, тому їх було обрано як об'єкт для аналізу та подальшого розроблення конструкції ВП. Нерознімні шатуни характеризуються великою кількістю необроблюваних поверхонь та складною просторовою геометричною формою, що спричиняє певні труднощі при базуванні та закріпленні заготовок та призводить до збільшення трудомісткості оброблення через збільшення кількості технологічних операцій, тому доцільним у цій роботі вважаємо розглянути саме оброблення нерознімних шатунів.

Сьогодні на світових ринках і у побуті представлено велике різноманіття моделей автомобілів, тракторів та мототехніки, поршневих компресорів та інших машин, що містять у своїй конструкції шатуни. Проте, як видно з рис. 1, конструкції нерознімних шатунів майже не відрізняються. При цьому типорозміри та конструктивні параметри нерознімних шатунів досить схожі й в одному ВП можна буде виконувати їх оброблення. Використання сучасних прогресивних верстатів дозволяє відійти від принципу повної орієнтації заготовки у ВП, а вимагає лише надійного закріплення, щоб забезпечити надійність положення заготовки у процесі оброблення.

У [14] було запропоновано прогресивний ТП оброблення нерознімних шатунів за один установ у ВП із неповним базуванням, на який було отримано патент на корисну модель [15]. Ця конструкція ВП була досліджена методами чисельного моделювання і результати, що представлені у роботі [14], за показниками напружень, переміщень та власних частот коливань дають можливість говорити про перспективний напрямок досліджень і розроблень ВП, заснованих на принципі неповного базування. Схема базування у ВП, що захищений патентом на корисну модель [15] (рис. 2), передбачає наявність установлювальної бази по одній з більш широких необроблюваних площин шийки шатуна та напрямної бази по одній із площин меншої ширини, що також необроблена (рис. 3), а закріплення відбувалось по площині меншої ширини, що протилежна напрямній базі. Запропонований ВП, призначений для встановлення нерознімних шатунів різних типорозмірів у діапазоні довжини 140-200 мм, ширини 35-50 мм та висоти 17-24 мм, що здійснюється шляхом регулювання гвинтових механізмів, які забезпечують зміну відстані між установлювально-затискними елементами (рис. 2).

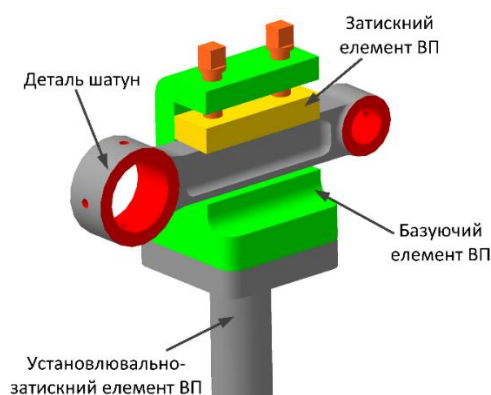


Рис. 2. Гнучкий ВП із неповним базуванням [15]

Джерело: розроблено авторами.

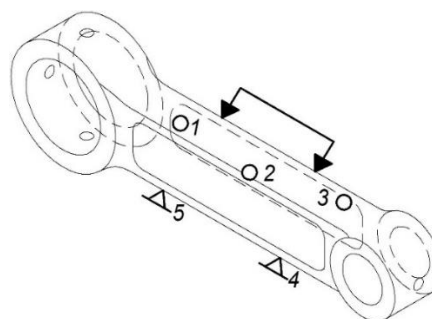


Рис. 3. Схема базування у гнучкому ВП  
Джерело: розроблено авторами.

Проте в результаті досліджень напружено-деформованого стану [14] було виявлено, що пружні деформації у корпусній частині скоби все ж виникали і не дозволяли повною мірою використати максимальну силу закріплення, що могли б витримати гвинти, яка потрібна для забезпечення сталого положення при обробленні шатунів із максимальними габаритними розмірами, що дозволяє технічна характеристика ВП.

Таким чином, для мінімізації впливу пружних деформацій під час затягування гвинтів та збільшення площі поверхні для закріплення ВП [15] було вдосконалено шляхом зміни принципу закріплення шатуна. Базові поверхні залишаються також необробленими, установлювальною базою залишається одна з більш широких необроблюваних площин шийки шатуна, напрямною базою являється одна з площин меншої ширини (рис. 4), а закріплення відбуватиметься по площині більшої ширини, що протилежна установлювальній базі. 3D – модель удосконаленого ВП зображено на рис. 5.

Оскільки принцип дії запропонованого ВП (рис. 5), як і ВП, що уже був досліджений методами чисельного моделювання (рис. 3) у [14] заснований на необхідності забезпечення абсолютної надійності закріплення, то для визначення можливості досягнення точності розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь при проведенні механічного оброблення першим кроком необхідно виконати статичний аналіз ВП. Для цього виконувалось чисельне моделювання напружено-деформованого стану та визначено переміщення елементів системи «ВП – заготовка» у модулі Static Structural розрахункового комплексу ANSYS Workbench.

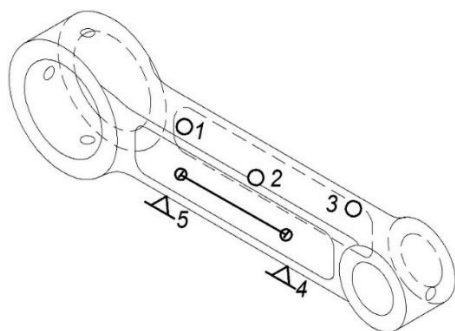


Рис. 4. Схема базування в удосконаленому гнучкому ВП  
 Джерело: розроблено авторами.

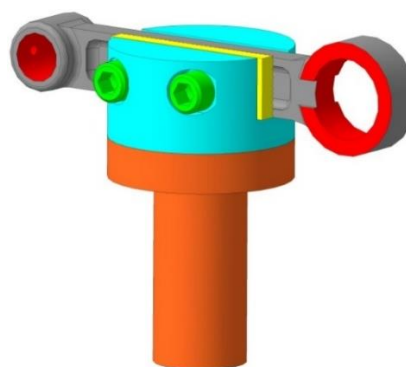


Рис. 5. 3D-модель удосконаленого гнучкого ВП із неповним базуванням  
 Джерело: розроблено авторами.

При моделюванні задавались такі граничні умови (табл. 1) та властивості матеріалу ВП та заготовки, аналогічними як і у [14]. Модель ВП враховує кулонівське тертя між контактними поверхнями ВП, які мають приблизно однакову величину шорсткості (1,6 мкм за критерієм Ra) з коефіцієнтом 0,1.

Таблиця 1 – Групи контактних пар удосконаленого ВП для шатунів

Верстатний пристрій і схема розташування контактів				
Базова поверхня/ тип закріплення	Параметри реалізованих груп з'єднань			
	Контакт	Поверхні, що контактують	Вид поверхонь, що контактують	Коефіцієнт тертя f
циліндрична поверхня пристрою/ fixture support	1	поверхня прижимної пластини / верхня поверхня шийки шатуна	рифлені / необроблені	0,7
	2	торцева поверхня опори / торцева площина шийки шатуна	гладкі / необроблені	0,2

Джерело: розроблено авторами

У процесі моделювання відбувалося прикладення сил та моментів різання до кожної з оброблюваних поверхонь по чергово, оскільки за технологічними можливостями верстат може виконувати одне інструментальне оброблення. Значення сил на різних переходах оброблення варіювалось в межах 505...2937 Н та крутних моментів 45...142 Н·м залежно від способу та стадії оброблення. При цьому на прижимну пластину з боку гвинтів діяла постійна сила закріплення 2000 Н, прикладена до кожного з них.

Сукупність даних граничних умов дозволили реалізувати моделювання реального процесу під час статичного навантаження. При цьому отримані значення максимальних еквівалентних напружень за IV гіпотезою міцності Губера-Мізеса і максимальних переміщень елементів системи «ВП – заготовка» (табл. 2). Також для порівняння в табл. 2 зведені аналогічні показники для ВП (рис. 3), що досліджувався у [14].

Таблиця 2 – Порівняння результатів чисельного моделювання гнучкого ВП із неповним базуванням та удосконаленого ВП для шатунів

Технологічний перехід, де виникають найбільші навантаження	Максимальні переміщення елементів ВП, мм				Допустимі переміщення, мм	Максимальні напруження, МПа		Допустимі напруження, МПа
	удосконаленого		[патент] (рис. 3)			удосконаленого	[патент] (рис. 3)	
	за осями	загальні	за осями	загальні				
Фрезерування торця великої бобишки	0,014	0,059	0,021	0,071	0,13	241	377	600
Свердління отвору діаметром 15,5 мм у малій бобишці	0,052	0,068	0,069	0,093	0,15	298	412	600
Розсвердлювання отвору діаметром 29,5 мм у великій бобишці	0,051	0,084	0,072	0,121	0,15	276	372	600

Джерело: розроблено авторами.

Відповідно до результатів чисельного моделювання переміщення, що виникають на всіх переходах механічного оброблення, в удосконаленому ВП не перевищують як абсолютних допустимих значень, так і значень за осями координат. Це свідчить про те, що задана конструктором точність буде витримана. Напруження під час прикладення статичного навантаження в удосконаленому ВП також знаходяться в допустимих межах. Також при порівнянні напружень і переміщень в удосконаленому ВП і ВП (рис. 3), що був досліджений раніше встановлено, що вони менші за показники аналогічних переходах. При цьому максимально напруженим елементом у системі є саме заготовка. Отримані результати дозволяють перейти до експериментальних досліджень напружено-деформованого стану системи «ВП – заготовка» для удосконаленого ВП.

Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану системи «ВП – заготовка» є наступним етапом для переходу до оброблення в динамічному режимі. Також експеримент в статичі необхідний для перевірки адекватності результатів чисельного моделювання, шляхом зіставлення їх з результатами натурних експериментів для удосконаленого ВП, який був виготовлений за номінальними розмірами, аналогічними розмірам у моделі (рис. 5). Як експериментальний зразок було взято шатун від мотоцикла Honda 200 cb, фото якого зображено на рис. 6, а, а ескіз з основними розмірами на рис. 6, б. Також на рис. 7 представлений експериментальний зразок удосконаленого ВП.

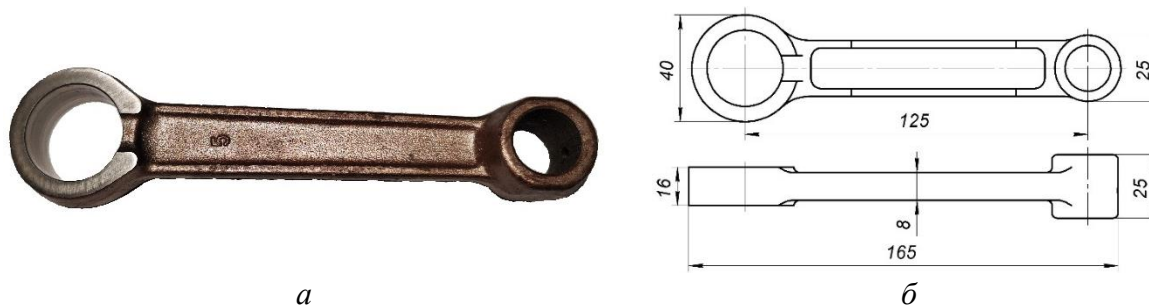
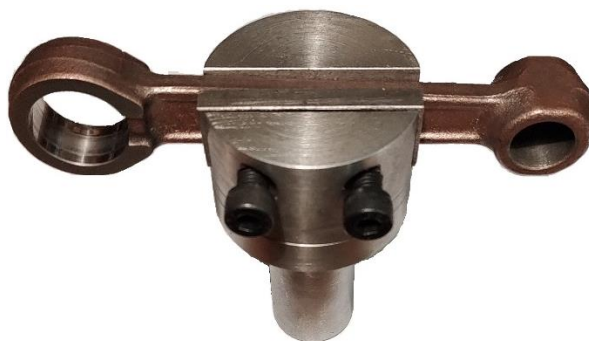


Рис. 6. Шатун мотоцикла Honda 200 cb200:  
а – фото; б – ескіз з основними розмірами

Джерело: розроблено авторами.

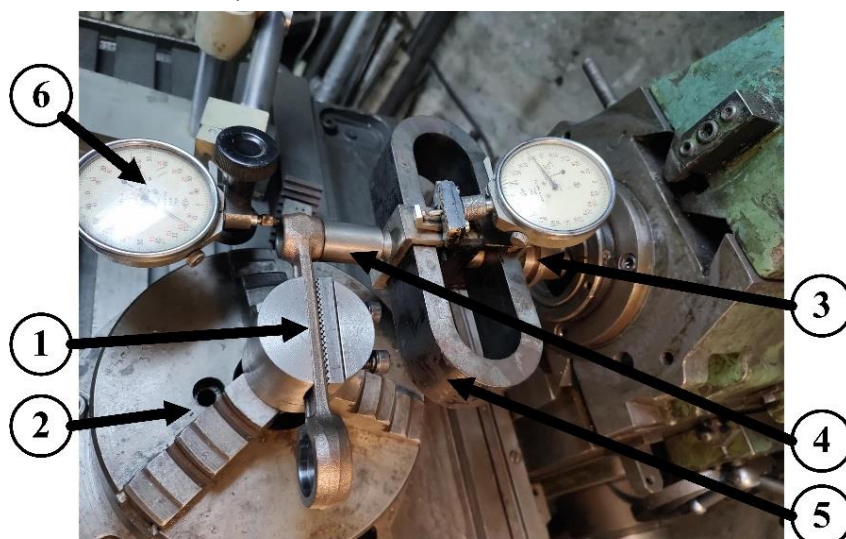


*Рис. 7. Експериментальний зразок удосконаленого ВП з неповним базуванням для оброблення деталей типу шатуни*

Джерело: розроблено авторами.

Статичні експериментальні дослідження передбачали прикладання навантажень до місць оброблюваних поверхонь деталі та вимірювання величин переміщень у точці прикладання навантаження. Це було реалізовано шляхом створення експериментальної установки (рис. 8) для закріплення ВП і прикладення до нього навантажень на базі широкоуніверсального фрезерного верстата моделі 676.

На фотографії експериментальної установки (рис. 8) удосконалений ВП 1 (рис. 5) закріплювався в трьохкулачковому патроні 2, який, у свою чергу, був встановлений на столі верстата. Сила, що діє на заготовку, прикладалась через оправку шпинделя 3, встановлену у шпинделі верстата. Також у кожному з головок шатуна були по чергово встановлені оправки 4 для можливості базування механічного динамометра 5. Динамометр моделі Mohr & FEDERHAFF MANNHEIM являє собою таровану пружинну скобу, жорсткість якої відома та становить 6 Н/мкм. Динамометр оснащений індикатором годинникового типу моделі МІГ1 ГОСТ 9696-82, ціна поділки якого становить 1 мкм. Переміщення елементів ВП фіксувалось за допомогою індикатора 6 також моделі МІГ1 ГОСТ 9696-82, що встановлений в індикаторній стійці на столі верстата та контактує своєю вимірювальною поверхнею із торцем бобишки, що протилежний торцю, до якого прикладається сила. Значення навантажень відповідали значенням, що задавались під час чисельного моделювання.



*Рис. 8. Експериментальна установка для визначення переміщень елементів ВП*

Джерело: розроблено авторами.

У результаті експериментальних досліджень отримали значення десяти величин переміщень на кожному з досліджуваних переходів механічного оброблення (рис. 9) та визначили середньоарифметичні значення переміщень. Дані значення було зведено у



табл. 3 та виконано чисельне порівняння відповідних величин, визначені абсолютні та відносні відхилення експериментальних даних і даних, отриманих у результаті чисельного моделювання.

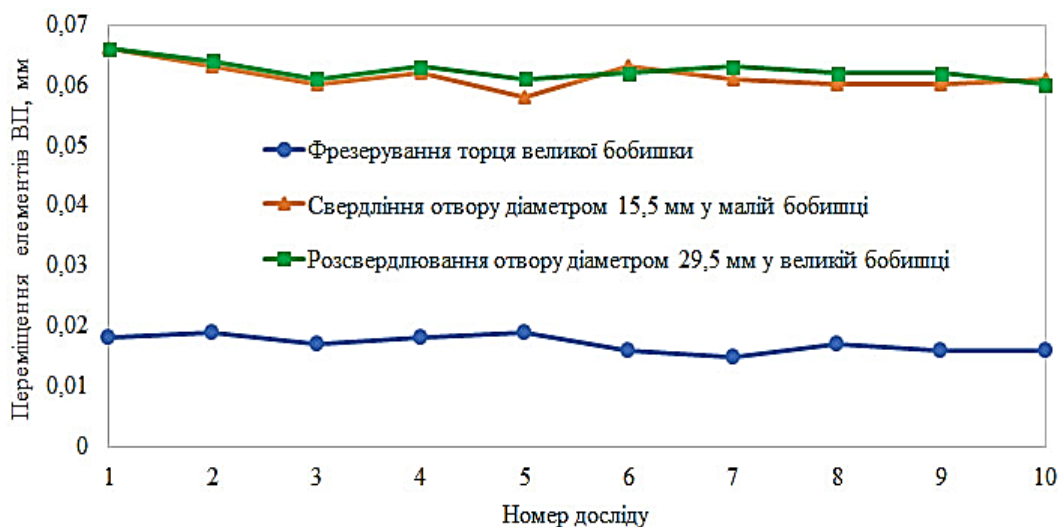


Рис. 9. Результати експериментальних дослідів визначення переміщень ВП на переходах

Джерело: розроблено авторами.

У результаті експериментальних досліджень та визначення середньоарифметичних значень переміщень по оброблюваним поверхням на найбільш навантажених переходах і зведення їх у табл. 3 було отримано чисельне порівняння відповідних величин, визначені абсолютні та відносні відхилення експериментальних даних і даних, отриманих у результаті чисельного моделювання.

Таблиця 3 – Порівняння результатів чисельного моделювання гнучкого ВП із неповним базуванням та удосконаленого ВП для шатунів

Технологічний перехід, де виникають найбільші навантаження	Максимальні переміщення елементів удосконаленого ВП вздовж осі вимірювання, мм		Допустимі переміщення, мм	Величина допустимого запасу по переміщенням, мм	Абсолютне відхилення, мм	Відносне відхилення, %
	під час чисельного моделювання	під час експериментальних досліджень				
Фрезерування торця великої бобишки	0,014	0,017	0,13	0,113	0,003	17,6
Свердління отвору діаметром 15,5 мм у малій бобишці	0,052	0,061	0,15	0,089	0,009	14,7
Розсвердлювання отвору діаметром 29,5 мм у великій бобишці	0,051	0,062	0,15	0,088	0,011	17,7

Джерело: розроблено авторами.

Із результатів, що представлені в табл. 3 видно, що величини переміщень, отриманих експериментальним шляхом не перевищують допустимих значень цих параметрів, хоча і є вищими ніж під час чисельного моделювання в межах 14,7...17,7 % залежно від переходу механічного оброблення. Це можна пояснити реальними умовами експерименту та похибками, що виникають під час виготовлення та виконання вимірювань. Хоча в цьому

випадку максимальна відносна похибка становила менше за 20 %, при тому, що величина запасу до допустимих значень переміщень є доволі суттєвою у порівнянні із самими значеннями переміщень на конкретних переходах.

**Висновки.** На основі чисельного моделювання величини напружень та переміщень в удосконаленому ВП, що був розроблений із застосуванням принципів неповного базування, теоретично доведено, що величини напружень в елементах конструкції ВП не перевищують допустимих значень за характеристиками матеріалів системи «ВП – заготовка». При цьому величина напружень на 26...36 % менша від значень на відповідних переходах у порівнюваному ВП. Також встановлено, що величини загальних переміщень оброблюваних поверхонь в удосконаленому ВП, який був розроблений на основі дослідженого раніше технічного рішення, не перевищують допусків на оброблювальні поверхні та на 17...30 % менші за відповідні значення з порівнюваним ВП. Значення переміщень за осями координат вздовж яких прикладалось навантаження також не перевищують допустимих конструктором значень та 25...33 % менші за відповідні показники із порівнюваним ВП.

Вперше експериментально доведено, що конструкція удосконаленого ВП для оброблення шатунів здатна забезпечувати необхідну точність оброблення при статичному навантаженні, адже величини переміщень хоча і більші, ніж під час чисельного моделювання на 3...11 мкм, що у відносному вираженні становить 14,7...17,7 % залежно від переходу механічного оброблення, проте не перевищують допустимих значень.

Встановлено, що величина допустимого запасу по переміщенням на окремих переходах варіюється від 0,088 мм до 0,113 мм, тобто залишається певний запас точності на можливі похибки механічного, що неминуче виникнуть під час оброблення.

Отримані результати дозволяють говорити про перспективи застосування ВП із неповним базуванням для оброблення нерознімних шатунів за одне установаження на підприємствах із дрібносерійним типом виробництва та загалом про доцільність проектування ВП, заснованих на такому принципі для інших класів деталей складної форми. Тому подальші дослідження будуть спрямовані на експериментальні дослідження характеристик точності та жорсткості ВП в динамічному режимі під час здійснення процесу оброблення.

### Список використаних джерел

1. Диба М. І. Виклики Індустрії 4.0 у контексті її становлення на глобальному і національному рівнях / М. І. Диба, Ю. О. Гернего // Економіка України. – 2020. – № 6. – С. 43-59.
2. Кваша О. І. Реалізація концепції «LEAN PRODUCTION» як спосіб заощадження у національному виробництві / О. І. Кваша, О. В. Бондар-Підгурська // Європейський вектор модернізації економіки: креативність, прозорість та сталий розвиток: тези доповідей. – Х. : ХНУБА, 2018. – С. 129-132.
3. Lean Manufacturing, LEAN. (2022, 10 вересня) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/lean-manufacturing>.
4. Издательство стандартов (1978). Класс 72. Иллюстрированный определитель деталей. Классификатор ЕСКД 1.79.100 ОК 012-78.
5. Mouli S. Productivity improvement of a small scale industry by the application of an effective plant layout and weld-fixture design / S. Mouli, S. Kulkarni, S. Deepak // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 52, No. 3. – Pp. 367–372.
6. Computer aided machining fixture design algorithm and software based on case learning for near-net-shaped jet engine blade / D. Wu, H. Wang, L. Huang, Y. Wang // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 69. – Pp. 545–555.
7. Kopec M. Deformation of thin metal and composite sheets by using anti-buckling fixture for large deformation under tension–compression cyclic loading / M. Kopec, Z. Kowalewski // Thin-Walled Structures. – 2022. – Vol. 180. – Pp. 109886–109909.
8. Mori K. Estimation of supporting fixture receptance for thin-walled milling / K. Mori, A. Matsubara // CIRP Annals. – 2022. Vol. 71, No. 1. – Pp. 333–336.
9. Gašpar T. Optimal layout and reconfiguration of a fixturing system constructed from passive Stewart platforms / T. Gašpar, I. Kovač, A. Ude // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 60. – Pp. 226-238.

10. Elastic mechanics-based fixturing scheme optimization of variable stiffness structure workpieces for surface quality improvement / G. Li, S. Du, D. Huang, C. Zhao, Y. Deng // *Precision Engineering*. – 2019. – Vol. 56. – Pp. 343–363.
11. An adaptive fixture for suppress vibrations and measuring workpiece deformation of thin-walled casings / S. Chai, L. Ouyang, Q. Bi, J. Yu, Y. Zhang // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 101. – Pp. 322–325.
12. Design of self-tuneable mass damper for modular fixturing systems / J. Munoa, A. Iglesias, A. Olarra, Z. Dombovari, M. Zatarain, G. Stepan // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 65, No. 1. – Pp. 389–392.
13. Experimental study of static and dynamic rigidities of flexible particulate bed fixtures under external vertical and torque loads / J. Abou-Hanna, K. Okamura, T. McGreevy // *Journal of Manufacturing Systems*. – 1994. – Vol. 13, No. 1. – Pp. 451–452.
14. Development of Flexible Fixtures with Incomplete Locating: Connecting Rods Machining Case Study / V. Ivanov, F. Botko, I. Dehtiarov, M. Kočiško, A. Evtuhov, I. Pavlenko, J. Trojanowska // *Machines*. – 2022. – Vol. 10, No. 7. – Pp. 493–506.
15. Переналаджуваний верстатний пристрій для оброблення деталей типу шатуни (Український патент № 149174) [Електронний ресурс] / І. М. Дегтярьов, В. О. Іванов, І. О. Косов, Є. С. Лобов, І. В. Павленко, І. С. Парфенцев // Державна служба інтелектуальної власності України. – 2021. – Режим доступу: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278691>.

### References

1. Dyba, M., & Gernego Y. (2020). Vyklyky Industriyi 4.0 u konteksti yiyi stanovlennya na hlobal"nomu i nacional"nomu rivniakh [Challenges of Industry 4.0 in the context of its development at the global and national levels]. *Ekonomika Ukrainy – Ukraine economy*, (6), 43–59.
2. Kvasha, I.O., & Bondar-Pidgurs'ka, O.V. (2018). *Realizaciya konceptsii «LEAN PRODUCTION» yak sposib zaoshhadzhennya u natsionalnomu vyrobnytstvi. Yevropeyskyi vektor modernizatsii ekonomiky: kreatyvnyist, prozorist ta stalji rozvytok [Implementation of the "LEAN PRODUCTION" concept as a way of saving in national production. The European vector of economic modernization: creativity, transparency and sustainable development]*. Kharkiv.
3. Lean Manufacturing, LEAN. <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/lean-manufacturing>.
4. *Izdatelstvo standartov [Standards publishing house] (1978). Klass 72. Ilyustry'rovannij opredelytel detalej. Klassyfykator ESKD 1.79.100 OK 012-78 Class 72 [Illustrated part guide. Classifier ESKD 1.79.100 OK 012-78]*.
5. Mouli, C., Kulkarni, S., & Deepak, S. (2022). Productivity improvement of a small scale industry by the application of an effective plant layout and weld-fixture design. *Materials Today: Proceedings*, 52(3), 367–372.
6. Wu, D., Wang, H., Huang, L., & Wang, Y. (2021). Computer aided machining fixture design algorithm and software based on case learning for near-net-shaped jet engine blade. *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 545–555.
7. Kopec, M., & Kowalewski, Z. (2022). Deformation of thin metal and composite sheets by using anti-buckling fixture for large deformation under tension–compression cyclic loading. *Thin-Walled Structures*, 180, 109886–109909.
8. Mori, K., & Matsubara, A. (2022). Estimation of supporting fixture receptance for thin-walled milling. *CIRP Annals*, 71(1), 333–336.
9. Gašpar, T., Kovač, I., & Ude, A. (2021). Optimal layout and reconfiguration of a fixturing system constructed from passive Stewart platforms. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 226–238.
10. Li, G., Du, S., Huang, D., Zhao, C., & Deng, Y. (2019). Elastic mechanics-based fixturing scheme optimization of variable stiffness structure workpieces for surface quality improvement. *Precision Engineering*, 56, 343–363.
11. Chai, S., Ouyang, L., Bi, Q., Yu, J., & Zhang Y. (2021). An adaptive fixture for suppress vibrations and measuring workpiece deformation of thin-walled casings. *Procedia CIRP*, 101, 322–325.
12. Munoa, J., Iglesias, A., Olarra, A., Dombovari, Z., Zatarain, M., Stepan, G. (2016). Design of self-tuneable mass damper for modular fixturing systems. *Procedia CIRP*, 65(1), 389–392.
13. Abou-Hanna, J., Okamura, K., McGreevy, T. (1994). Experimental study of static and dynamic rigidities of flexible particulate bed fixtures under external vertical and torque loads. *Journal of Manufacturing Systems*, 13(1), 451–452.
14. Ivanov, V., Botko, F., Dehtiarov, I., Kočiško, M., Evtuhov, A., Pavlenko, I., Trojanowska, J. (2022). Development of Flexible Fixtures with Incomplete Locating: Connecting Rods Machining Case Study. *Machines*, 10(7), 493–506.

15. Dehtiarov, I., Ivanov, V., Kosov, I., Lobov, E., Pavlenko, I., Parfentsev, I. (2021) *Perenalagodzhuvanyj verstatnyj prystrij dlya obroblennya detalej typu shatuny* (Ukrayinskyj patent № 149174). Derzhavna sluzhba intelektualnoyi vlasnosti Ukrainy. [Reconfigurable machine tool for processing connecting rod-type parts (Ukrainian patent No. 149174). State Service of Intellectual Property of Ukraine]. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278691>.

Отримано 30.09.2022

UDC 621.9-1/-9

**Ivan Dehtiarov<sup>1</sup>, Anna Neshta<sup>2</sup>, Illia Kosov<sup>3</sup>, Yaroslav Klok<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools  
Sumy State University (Sumv, 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>2</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools  
Sumy State University (Sumv, 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>3</sup>PhD Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools  
Sumy State University (Sumv, Ukraine)

**E-mail:** [iyakosov95@gmail.com](mailto:iyakosov95@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6472-6554>

<sup>4</sup>Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools  
Sumy State University (Sumv, Ukraine)

**E-mail:** [yarikklok11@gmail.com](mailto:yarikklok11@gmail.com)

## **EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE RIGIDITY OF FIXTURES WITH INCOMPLETE LOCATION FOR CONNECTING ROD TYPE PARTS**

*The use of modern machining centers with wide technological capabilities and the active development of productions with a small-scale form of organization necessitates an increase in the efficiency of fixtures capable of ensuring sufficient accuracy of machining with minimal costs.*

*Classical approaches to the design of fixtures do not always allow machining with one installation with high-performance cutting conditions, so it is necessary to move the new approaches that allow maximum tool availability, which is important for the competitiveness of enterprises.*

*The analysis of research and publications on numerical modeling and experimental research on the processing of parts of a complex shape that have insufficient rigidity showed that the issues of static research of the stress-deformation state of fixtures with incomplete locating have received little attention in the scientific literature.*

*The purpose of the article is to experimentally demonstrate the possibility of machining non-separable connecting rods in machine tools with incomplete basing and fastening only on unprocessed surfaces in one installation with the achievement of all the necessary indicators of dimensional accuracy.*

*The work presents for the first time an improved fixture with an incomplete location for machining connecting rod-type parts, and experimental studies of its stress-strain state in static mode are performed. The determined values of stresses and displacements compared with the previously proposed machine tool showed its technical advantage in bearing capacity for loads acting during machining.*

*In this work, it was experimentally proven for the first time that the design of the improved fixture for machining connecting rods is capable of providing the necessary machining accuracy under static load and at the same time has a margin of accuracy that exceeds the value of deformations by 1.5...2.5 times. The presented results and the positive experience of manufacturing a sample of a fixture can be used for its further research in a dynamic mode directly during machining, as well as for the design of technological equipment for parts of other classes, using an approach that involves incomplete locating of the workpiece.*

**Keywords:** accuracy; deviation; tension; numerical simulation; error.

**Tabl.:** 3. **Fig.:** 9. **References:** 15.