

**В. О. ІВАНОВ, І. М. ДЕГТЯРЬОВ, В. О. ЗАЛОГА, Є. В. БАСОВА**

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ВАЖЕЛІВ**

Верстатні пристрої відіграють важливу роль у забезпеченні випуску якісної продукції. Запропонована конструкція гнучкого верстатного пристрою забезпечує багатокоординатну обробку деталей типу важелів. Наявність механізмів регулювання, що дозволяють здійснювати переналадження установлювально-затискних елементів верстатного пристрою, підтверджує ефективність розробленого конструкторського рішення в умовах багатономенклатурного виробництва. Результати експериментальних досліджень механічної обробки деталей показали, що розміри (діаметри отворів, міжцентрові відстані) і взаємне розташування поверхонь знаходяться в межах призначених допусків. Шорсткість оброблених поверхонь важелів відповідає вимогам креслення. Запропонований верстатний пристрій не поступається спеціальному верстатному пристрою та забезпечує точність і якість оброблених поверхонь.

**Ключові слова:** верстатний пристрій; гнучкість; важіль; багатокоординатна обробка; якість; точність.

**В. А. ИВАНОВ, И. М. ДЕГТЯРЕВ, В. А. ЗАЛОГА, Е. В. БАСОВА**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА РЫЧАГОВ**

Станочные приспособления имеют важное значение в обеспечении выпуска качественной продукции. Предложенная конструкция гибкого станочного приспособления обеспечивает многокоординатную обработку деталей типа рычагов. Наличие механизмов регулирования, которые позволяют осуществлять переналадку установочно-затжимных элементов станочного приспособления, подтверждает эффективность разработанного конструкторского решения в условиях многономенклатурного производства. Результаты экспериментальных исследований механической обработки деталей показали, что размеры (диаметры отверстий, межцентровые расстояния) и взаимное расположение поверхностей находятся в пределах назначенных допусков. Шероховатость обработанных поверхностей рычагов соответствует требованиям чертежа. Предложенное станочное приспособление не уступает специальному станочному приспособлению и обеспечивает точность и качество обработанных поверхностей.

**Ключевые слова:** станочное приспособление; гибкость; рычаг; многокоординатная обработка; качество; точность.

**V. IVANOV, I. DEHTIAROV, V. ZALOGA, Y. BASOVA**

### **EXPERIMENTAL STUDIES OF MACHINING ACCURACY OF LEVERS**

Fixtures play an important role in ensuring the production of quality products. The proposed design of the flexible fixture provides multiaxis machining of lever-type parts. The presence of adjustment mechanisms that allow the re-adjustment of the locating-and-clamping elements of the fixture confirms the effectiveness of the design solution developed for multiproduct manufacturing. The results of experimental studies of parts machining showed that the dimensions (hole diameters, intercenter distances) and the mutual arrangement of surfaces are within the limits of the assigned tolerances. The roughness of the machined surfaces of the levers meets the requirements of the drawing. The proposed fixture is not inferior to a special fixture and ensures the accuracy and quality of the machined surfaces.

**Keywords:** fixture, flexibility, level, multiaxis machining, quality, accuracy.

**Вступ.** Інтенсифікація технологічних процесів і підвищення ефективності технологічного обладнання в машинобудуванні є одним із пріоритетних завдань, спрямованих на пошук оптимальних технічних рішень. Це підтверджується тим, що в умовах жорсткої конкуренції, стрімкого розвитку та використання новітніх технологій, машинобудівна галузь на підприємствах усього світу проводить постійний пошук впровадження нових та більш ефективних технологічних процесів (ТП). Основою підвищення якості продукції, збільшення продуктивності і зниження трудомісткості технологічних процесів на сьогоднішній день стала розробка гнучких верстатних пристроїв (ВП). Доцільно зазначити, що верстатні пристрої відіграють важливу роль у забезпеченні випуску конкурентоспроможної продукції, що підтверджується такими даними: частка у загальному обсязі технологічного оснащення складає 70–80% [1]; витрати при технологічній підготовці виробництва, проектуванні та виготовленні ВП досягають 90% [2]; вартість ВП становить 10–20% загальної вартості виробничих систем [3]; до 40% бракованих деталей у

машинобудуванні виникає через недосконалість ВП [4].

#### **Аналіз останніх досліджень та літератури.**

Аналіз джерел інформації показав, що процес проектування ВП це трудомісткий та складний процес, який потребує урахування багатьох параметрів. Тому при проектуванні ВП, як правило, розглядається механічна система «ВП – заготовка». Автором статті [5] запропоновано скінченноелементу модель, яка показує взаємозв'язок контактною пружності з розподілом тиску в місці контакту в системі «ВП – заготовка» та дозволяє передбачити нормальні і тангенціальні контактні сили, а також розподіл тиску на кожному елементі системи «ВП – заготовка» без обмежень на типи оброблюваних матеріалів. Z. Liu та ін. [6] побудували багатокритеріальний генетичний алгоритм, що заснований на методах оптимізації та об'єднує у собі геометричну модель системи «ВП – заготовка» та модель контактною пружності та розрахунку розподілу тиску, враховуючи тертя в системі «ВП – заготовка», який дозволяє прискорити розрахунки та використовувати при цьому менші ресурси обчислювальних машин. M. Vasundara та ін.

[7] виконали дослідження максимальної величини пружної деформації заготовки при її закріпленні у різних ВП і здійснили підбір оптимального компонування ВП, де перевага надавалась конструкції з найменшими деформаціями. В. Li та S. Melkote [8] представили метод багатократної (повторної) оптимізації визначення місця розташування затискних елементів ВП при розрахунках динамічних параметрів системи «ВП – заготовка». За рахунок використання оптимізаційних методів для 3D-моделей даних систем максимальна величина позиційного вектора похибки обробки була скорочена на 58%. А. Nalbandh та С. Rajuaguru [9] запропонували використовувати «генетичний алгоритм» проектування та оптимізації конструкції ВП, що базується на імовірнісних методах розрахунку та може бути використаний для знаходження глобального оптимуму рішення для багатьох типів оптимізаційних розрахунків, що в подальшому може бути інтегрована з САПР ТП. У роботі [10] розроблено спосіб моделювання та оптимізації верстатних пристроїв при нестационарних умовах, подібно до реального процесу різання з метою виявлення оптимальної конструкції ВП. Т. Papastathis [11] підкреслює важливість впровадження переналаджуваних ВП, але акцентує увагу на складності вибору оптимальної конструкції ВП для обробки нежорстких деталей. При цьому вирішується питання щодо регулювання величини сили закріплення залежно від величини сили різання. У роботі [12] досліджено тертя між функціональними елементами верстатного пристрою та заготовкою, а також визначено деформації, що виникають у місцях їх контакту. Автори статті [13] розробили комплексну модель системи «ВП – заготовка», при моделюванні якої визначено вплив попереднього навантаження від сил закріплення та сил, що виникають у процесі обробки та вимушених коливань, на похибку оброблюваної плоскої поверхні. У. Kang [14] розробив модель системи «ВП – заготовка» для формулювання задач стійкості положення заготовки та обчислення мінімального зусилля закріплення, необхідного для механічної обробки, а також вплив послідовності закріплення затискними елементами. J. Asante [15] обчислив і дослідив вплив піддатливості ВП і режимів різання на стабільність положення заготовки, та використав його як основу для вибору відповідного ВП серед кількох альтернатив, застосовуючи аналітичний підхід. V. Cioata і I. Kiss [16] розробили та представили спрощену аналітичну модель контактної деформації між затискними елементами ВП і заготовкою, і скінченноелементну модель для оцінки контактної деформації у місцях контакту затискних елементів ВП і заготовки. У. Zheng [17] розробив скінченноелементну модель визначення стійкості положення ВП із контактними елементами для розв'язання контактних задач при закріпленні заготовки у ВП. У. Rong та У. Bai [18] провели ряд досліджень у галузі точності обробки та аналізу

стійкості положення ВП, перетворюючи просторову задачу у плоску задачу за рахунок «діючого фактора», що враховує дію сили тертя. У. Chou та ін. [19] розробили методику визначення точок закріплення, а також необхідної сили закріплення для забезпечення стійкості положення заготовки у процесі обробки за рахунок застосування гвинтових механізмів закріплення у ВП. М. Y. Wang [20] представив компонування ВП для заготовок складної форми, заснований на концепції оптимального планування експерименту. У. Rong та ін. [21] представили алгоритм знаходження та оцінювання похибки базування шляхом аналізу чутливості функцій для схеми базування у призмах. М. Estrems та ін. [22] визначили зміну у фіксуєчому отворі всередині обертання заготовки при цьому заготовка була зорієнтована за допомогою двох призм, щоб визначити, як відбувається зміна величини розмірів залежно від точності ВП. J. Hou та А. Trappey [23] застосували призми як притискачі для стабільної та ефективної роботи при установленні непризматичних деталей типу циліндрів, базуючись на оцінці мінімальних деформацій та застосуванні підходу з використанням жорсткої конструкції ВП. К. Afzeri та ін. [24] оптимізували конфігурацію затискного ВП контактної типу, де заготовка утримувалась за допомогою точкових контактів із певним розташуванням масиву затискачів під дією сил тертя на контактних поверхнях. W. Cai [25] оптимізував макет точкового контакту зведенням до мінімуму варіантів покриття площі заготовки, представлений як деякий ключ процесу контакту в місцях характерних точок. А. Al-Nabaibeh та ін. [26] представили систему точкового типу для закріплення деталей складної форми в аерокосмічній промисловості, експериментальне дослідження якої підтвердило, що запропонована система може бути швидко переналаджена для обробки деталей складної форми.

Таким чином, у даний час актуальним є розрахунки та розробка моделей процесів взаємодії у системі «ВП – заготовка», а також дослідження точності механічної обробки при зміні параметрів ВП. Проте недостатньо уваги приділяється підвищенню гнучкості ВП та інтенсифікації технологічних процесів, що з появою нових компонувань верстатів, здатних виконувати багатокординатну обробку, є актуальною задачею. Це дозволяє використати резерви для скорочення штучного часу обробки деталі за рахунок зменшення в ньому частки допоміжного часу, що при невеликих партіях та частій зміні номенклатури деталей може бути вигідним з точки зору собівартості продукції.

#### **Методика експериментальних досліджень.**

Експериментальні дослідження проведено з метою визначення дійсних розмірів оброблюваних поверхонь та їх відносного розташування, а також шорсткості оброблених поверхонь.

Об'єктом обробки є двоплечий важіль (рис. 1), який потребує обробки поверхонь із кількох сторін. У якості заготовки, для виконання натурального

експерименту, були використані вилівки з чавуну марки СЧ20 ГОСТ 1412-85. Обробка важеля виконувалася на 5-ти координатному обробному центрі вертикального компоновання моделі DECKEL MAHO DMU 50V.

Для можливості доступу до усіх поверхонь важеля без ризику зіткнень рухомих елементів верстата та верстатного пристрою запропонований ВП [27] був додатково установлений у трикулачковому патроні 7100-0032 ГОСТ 2675-80 (рис. 2). При цьому виконано його попередню вивірку щодо осі обертання стола, та для досягнення співвісності патрона з основою ВП застосовувалось усунення похибок биття кулачків шляхом їх оброблення у закріпленому патроні на столі верстата. При настроюванні пробна заготовка установлювалась симетрично осі ВП у вертикальній та горизонтальній площинах у межах 0,5 мм за вимогами креслення. У подальшому інші заготовки встановлювались без вивірки. Спеціальний ВП встановлювався безпосередньо на столі верстата (рис. 3).

Установлення заготовок у спеціальному ВП відбувалось шляхом їх базування на оправці. При цьому центральний отвір був попередньо оброблений до розмірів згідно з кресленням і максимальний зазор у парі «оправка – деталь» складав 0,03 мм, що менше допусків на міжцентрові відстані.

Обробка заготовок у запропонованому та спеціальному ВП виконувалась із розрахованими по довідникам та визначеними за каталогами режимами різання (табл. 1). Змащувально-охолоджуючі рідини не застосовувались.

Під час обробки на кожному з переходів вібрацій та інших непередбачуваних явищ не виникло. Досягнення точності лінійних розмірів здійснено за рахунок корекції інструмента після першого проходу при обробці першої заготовки. У подальшому корегування не проводились. Усього за час проведення експерименту оброблено 100 важелів (по 50 у кожному ВП).

Оброблені важелі пройшли перевірку точності, тобто оцінку відповідності розмірів оброблених деталей у ВП вимогам креслення. Вимірювання розмірів та взаємного розташування поверхонь виконувались на координатно-вимірювальній машині моделі 3D CNC SMS Thome Prazision Rapid (рис. 4–6). Також визначені міжцентрові відстані та лінійні розміри для партії деталей N = 20 шт.

#### Обробка результатів дослідження.

Протоколи вимірювань усіх розмірів оброблених деталей у запропонованому та спеціальному ВП зведені у табл. 2. У протоколи були занесені результати вимірювань 2-ї, 11-ї та 20-ї деталей для кожного ВП. На першій деталі для кожного ВП виконувалось налагодження процесу обробки, тому дані деталі не брались до уваги.

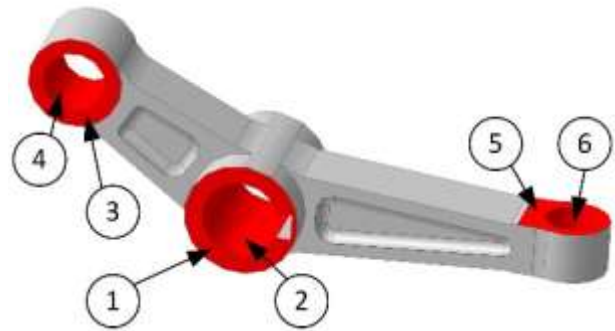


Рис. 1 – Тривимірний модель об'єкту механічної обробки: 1, 3, 5 – торці; 2, 4, 6 – отвори



Рис. 2 – Обробка допоміжного отвору важеля, що перпендикулярний головному, у запропонованому верстатному пристрої

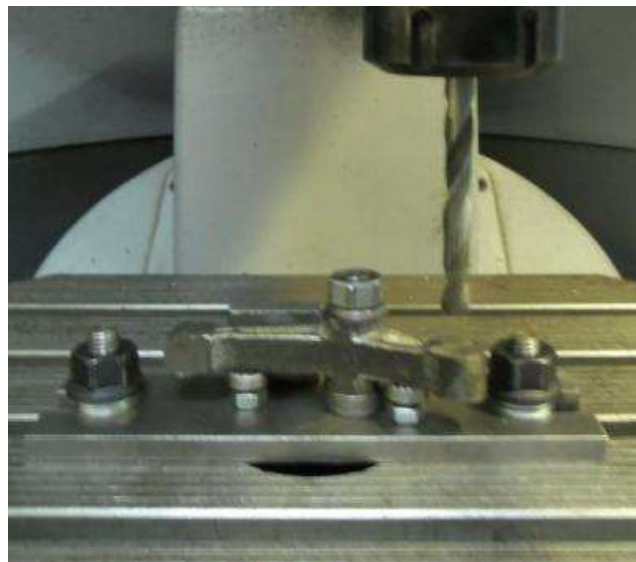


Рис. 3 – Обробка допоміжного отвору важеля, що паралельний головному, у спеціальному верстатному пристрої

Таблиця 1 – Режими різання на переходах механічної обробки важеля

Номер поверхні (рис. 1)	Перехід	Різальний інструмент (матеріал)	Глибина різання $t$ , мм	Подача $S_0$ , мм/об	Швидкість різання $V$ м/хв
1	Фрезерування	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
2	Свердління	Свердло спіральне (P6M5)	7,3	0,45	30
	Розточування	Різець (BK8)	0,15	0,07	100
3	Фрезерування	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
4	Свердління	Свердло спіральне (P6M5)	5,85	0,4	30
	Розгорткування	Розгортка (P6M5)	0,15	1,6	11
5	Фрезерування	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
6	Свердління	Свердло спіральне (P6M5)	4,85	0,38	30
	Розгорткування	Розгортка (P6M5)	0,15	1,6	11



Рис. 4 – Вимірювання розмірів головного отвору



Рис. 5 – Вимірювання розмірів допоміжного отвору, що паралельний головному



Рис. 6 – Вимірювання розмірів допоміжного отвору, що перпендикулярний головному

Усі розміри деталей, що були оброблені у запропонованому ВП, знаходяться в межах допусків, що задані на кресленні, а саме розміри отворів, міжцентрові відстані та взаємне розташування поверхонь оброблюваної деталі.

Максимальне відхилення міжцентрових відстаней від номінальних значень склало 0,03 мм для запропонованого ВП та 0,05 мм для спеціального ВП, що можна пояснити наявністю вищевказаного зазору для установлення заготовки у ВП.

Вимірювання шорсткості виконувалось на універсальному профілометрі моделі Mitutoyo SJ-400. За даними лабораторних вимірювань (табл. 3) шорсткість оброблених поверхонь важелів знаходиться у межах 1,33...1,54 мкм за критерієм  $R_a$ , що є допустимим відповідно до вимог креслення.

Таблиця 2 – Протокол вимірювання розмірів деталі «Важіль», мм

Розмір	Дослідні зразки важелів, оброблені у					
	запропонованому ВП			спеціальному ВП		
	№2	№11	№20	№2	№11	№20
Ø15H7 <sup>+0,018</sup>	15,015	15,014	15,015	–	–	–
Ø12H9 <sup>+0,043</sup>	12,012	12,012	12,011	12,012	12,011	12,011
Ø10H9 <sup>+0,036</sup>	10,011	10,011	10,011	10,011	10,011	10,011
26,5h12 <sub>-0,21</sub>	26,428	26,425	26,421	26,422	26,421	26,427
15h12 <sub>-0,18</sub>	14,991	14,995	14,992	14,988	14,988	14,988
10h12 <sub>-0,15</sub>	9,994	9,997	9,996	9,881	9,903	9,908
60±0,05	60,031	60,024	60,027	60,041	60,049	60,032
40±0,05	40,005	40,005	40,008	40,046	40,037	40,028

Таблиця 3 – Протокол вимірювання шорсткості поверхонь деталі «Важіль», мкм

Розмір	Шорсткість поверхонь дослідних зразків важелів, оброблених у					
	запропонованому ВП			спеціальному ВП		
	№2	№11	№20	№2	№11	№20
Ø15H7 <sup>+0,018</sup>	1,42	4,1	1,51	–	–	–
Ø12H9 <sup>+0,043</sup>	1,47	1,39	4,12	1,41	1,51	4,28
Ø10H9 <sup>+0,036</sup>	1,45	1,49	1,41	1,33	1,36	1,35
26,5h12 <sub>-0,21</sub>	1,48	1,45	1,54	1,42	1,48	1,52
15h12 <sub>-0,18</sub>	1,45	1,49	1,51	1,52	1,38	1,46
10h12 <sub>-0,15</sub>	1,44	1,47	1,53	1,49	1,51	1,38

Проте, на заготовках, де мають місце наявність раковин та ливарних пор, в окремих місцях шорсткість досягає 4,1...4,3 мкм за критерієм Ra.

Збільшення шорсткості можна пояснити нестационарними умовами різання, тобто нерівномірністю розподілення припуску, а також неминучим виникненням вібрацій на переривчастих поверхнях. Як видно з табличних даних, ця тенденція є справедливою як для запропонованого верстатного пристрою, так і для спеціального верстатного пристрою.

Фактичні значення відхилень від номінального розміру головного отвору, відхилення від

перпендикулярності допоміжного отвору Ø10H9 відносно головного Ø15H7 та фактичні значення шорсткості головного отвору для дослідної партії важелів наведені на рис. 7–9 відповідно.

Отже, результати контролю свідчать, що запропонований ВП не поступається спеціальному ВП у жодному компоненті за критерієм розмірної точності деталей, що оброблені у ньому та шорсткості поверхонь. Як видно з табл. 2, точність взаємного розташування поверхонь у запропонованому ВП вища, ніж у спеціальному ВП, що насамперед досягається за рахунок виконання механічної обробки за один установ.

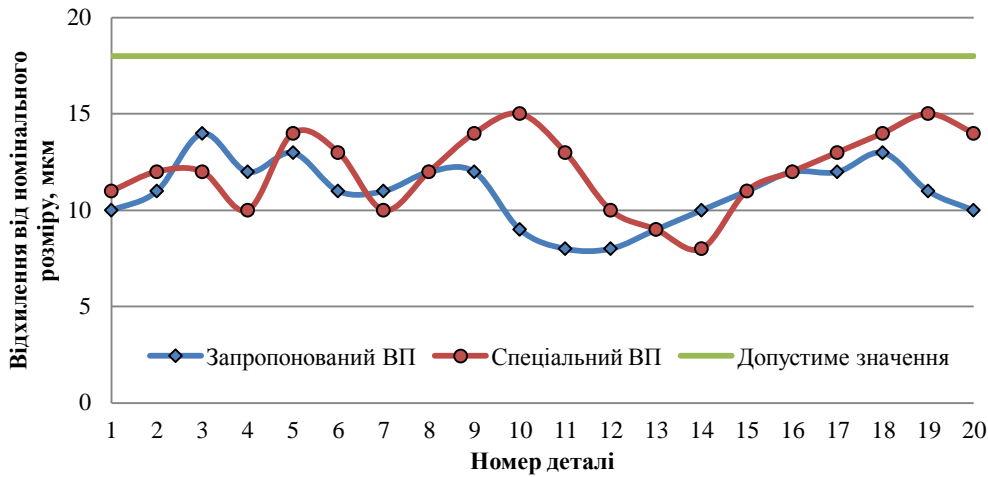


Рисунок 7 – Фактичні відхилення розміру головного отвору від номінального значення

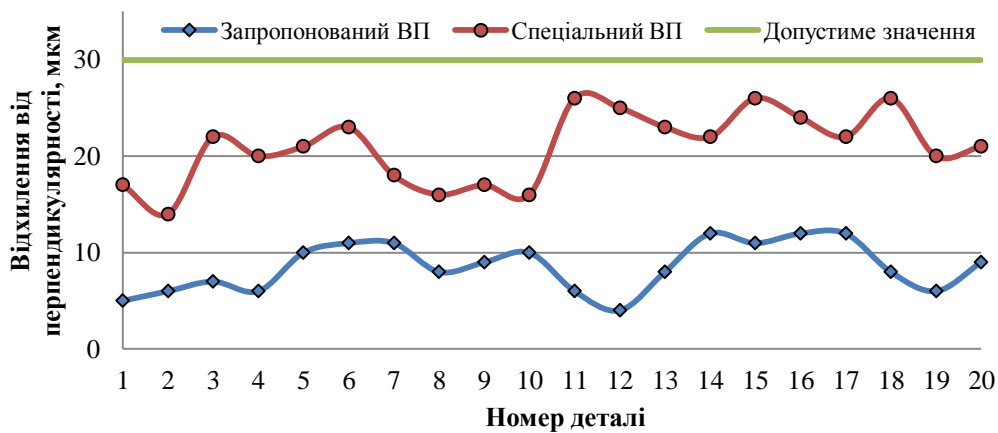


Рисунок 8 – Фактичні відхилення від перпендикулярності допоміжного отвору Ø10H9 відносно головного Ø15H7

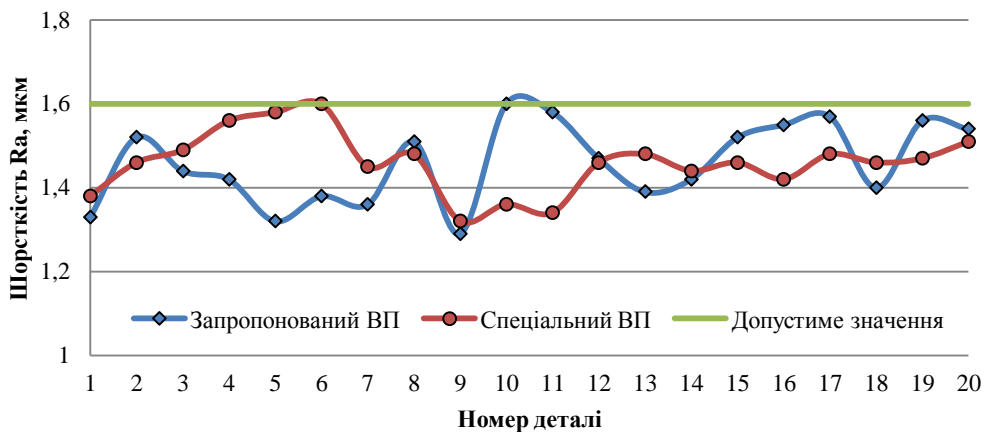


Рисунок 9 – Фактична шорсткість поверхні головного отвору

**Висновки.** Виконані експериментальні дослідження точності механічної обробки важелів у двох компонуваннях верстатних пристроїв показали, що усі розміри оброблених деталей знаходяться у межах призначених допусків на обробку, проте точність відносного розміщення поверхонь деталі, що оброблена у запропонованому верстатному пристрої вища у середньому на 0,02 мм. Максимальне

відхилення міжцентрових відстаней від номінальних значень склало 0,03 мм для запропонованого верстатного пристрою та 0,05 мм для спеціального верстатного пристрою. Шорсткість поверхонь, оброблених важелів знаходиться у межах 1,33...1,54 мкм за критерієм Ra, що відповідають вимогам креслення.

## Список литературы

1. Ряховский А. В. *Разработка и внедрение комплекта унифицированной технологической оснастки для обработки корпусных деталей специзделий... дис. канд. техн. наук : 05.02.08* Харьков, 1996. 135 с.
2. Иванов В.О. *Вибір оптимальних компоновок верстатних пристроїв для верстатів з ЧПК... дис. канд. техн. наук : 05.02.08* Харків, 2010. 239 с.
3. Hashemi H., Shaharoum A. M., Sudin I. A case-based reasoning for design of machining fixture. *International Journal of Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 74. pp. 113–124.
4. Wang H., Rong Y., Li H., Shaun P. Computer aided fixture design: recent research and trends. *Computer-Aided Design*, 2010. Vol. 42 (12). pp. 1085–1094.
5. Asante J. N. A combined contact elasticity and finite element-based model for contact load and pressure distribution calculation in a frictional workpiece-fixture system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 39. pp. 578–588.
6. Liu Z., Wang M., Wang K., Mei X. Multi-objective optimization design of a fixture layout considering locator displacement and force-deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 67. pp. 1267–1279.
7. Vasundara M., Padmahaban K. P., Sabareeswaran M., RajGanesh N. Machining fixture layout design for milling operation using FEA. *ANN and RSM. Procedia Engineering*. 2012. Vol. 38. pp. 1693–1703.
8. Li B., Melkote S. Optimal fixture design accounting for the effect of workpiece dynamics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 28. pp. 701–707.
9. Nalbandh A. H., Rajyaguru C. C. Fixture design optimization using genetic algorithm-a review. *Journal of information, knowledge and research in mechanical engineering*. 2013. Vol. 2. pp. 466–471.
10. Amaral N. *Finite element analysis study on fixtured workpiece deformation : Bachelor of Science Thesis*. Worcester, USA, 2000. 109 p.
11. Papastathis T. N. *Modelling and design methodology for fully-active fixtures* : PhD Thesis. The University of Nottingham, Great Britain, 2010. 272 p.
12. Kumbhar N., Patil G., Mohite S., Sutar M. Finite element modelling and analysis of workpiece-fixture system. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2, Issue. 2. pp. 60–65.
13. Hu S., Liao Y. An integrated model of a fixture–workpiece system for surface quality prediction. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 17. pp. 810–818.
14. Kang Y., Rong Y., Yang J.C. Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. Vol. 21. pp. 842–849.
15. Asante J. N. Effect of fixture compliance and cutting conditions on workpiece stability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 48. pp. 33–43.
16. Cioata V., Kiss I. The machining error due to contact deformation of workpiece-fixture system. *Bulletin of ACTA Technical Engineering*. 2009. pp. 33–36.
17. Zheng, Y. *Finite element analysis for fixture stiffness* : PhD Thesis. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2005. 148 p.
18. Rong Y., Bai Y. Automated generation of modular fixture configuration design. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1997. Vol. 119(2). pp. 208–219.
19. Chou Y.C. Automated fixture design for concurrent manufacturing planning. *Concurrent Engineering: Res. & Appl.* 1993. Vol. 1. pp. 219–229.
20. Wang M. Y. Automated fixture layout design for 3D workpieces. *International Journal of Robotics and Automation*. 1999. no 2. pp. 1577–1582.
21. Rong Y., Hu W., Kang Y. et al. Locating error analysis and tolerance assignment for computer-aided fixture design. *International Journal of Production Research*. 2001. no 39. pp. 3529–3545.
22. Estrems M., Sanchez H. T., Faura F. Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. no21. pp. 384–390.
23. Hou J. L., Trappey A. J. Methodology for applying V-blocks and clamps to non-prismatic workpart fixtures. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 1997. no 10. pp. 152–167.
24. Afzeri K., Konneh M., Sutjipto A. J., Aminanda Y. Optimization of pin type fixture configurations. *International Journal Science Engineering Technology*. 2008. no 1. pp 33–40.
25. Cai W. Robust pin layout design for sheet-panel locating. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. no 28. pp. 486–494.
26. Al-Habaibeh A., Gindy N., Parkin R. M. Experimental design and investigation of a pin-type reconfigurable clamping system for manufacturing aerospace components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2003. no12. pp. 1771–1777.
27. Иванов В. О., Дегтярьов І. М., Карпусь В. Є. Пат. 98925, Україна. *Переналаджуваний установлювальнo-затискний модуль для обробки деталей типу важелів*, 2015

## References (transliterated)

1. Riakhovskiy A. *Razrabotka i vnedrenie kompleksa unificirovamoj tekhnologicheskoy osnastki dlya obrabotki korpusnyh detalej specizdelij... dis. kand. tekhn. nauk : 05.02.08* [Development and implementation of a set of standardized tooling for processing body parts of special products. Cand. tech. sci. diss. (Ph. D.)] Kharkov, 1996. 135 p.
2. Ivanov V. *Vibir optimal'nih komponentov verstatnih pristroiv dlya verstativ z CHPK... dis. kand. tekhn. nauk : 05.02.08* [Choosing the best layout of machine tools for CNC machines... Cand. tech. sci. diss. (Ph. D.)] Kharkiv, 2010. 239 p.
3. Hashemi H., Shaharoum A. M., Sudin I. A case-based reasoning for design of machining fixture. *International Journal of Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 74. pp. 113–124.
4. Wang H., Rong Y., Li H., Shaun P. Computer aided fixture design: recent research and trends. *Computer-Aided Design*, 2010. Vol. 42 (12). pp. 1085–1094.
5. Asante J. N. A combined contact elasticity and finite element-based model for contact load and pressure distribution calculation in a frictional workpiece-fixture system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 39. pp. 578–588.
6. Liu Z., Wang M., Wang K., Mei X. Multi-objective optimization design of a fixture layout considering locator displacement and force-deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 67. pp. 1267–1279.
7. Vasundara M., Padmahaban K. P., Sabareeswaran M., RajGanesh N. Machining fixture layout design for milling operation using FEA. *ANN and RSM. Procedia Engineering*. 2012. Vol. 38. pp. 1693–1703.
8. Li B., Melkote S. Optimal fixture design accounting for the effect of workpiece dynamics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 28. pp. 701–707.
9. Nalbandh A. H., Rajyaguru C. C. Fixture design optimization using genetic algorithm-a review. *Journal of information, knowledge and research in mechanical engineering*. 2013. Vol. 2. pp. 466–471.
10. Amaral N. *Finite element analysis study on fixtured workpiece deformation : Bachelor of Science Thesis*. Worcester, USA, 2000. 109 p.
11. Papastathis T. N. *Modelling and design methodology for fully-active fixtures* : PhD Thesis. The University of Nottingham, Great Britain, 2010. 272 p.
12. Kumbhar N., Patil G., Mohite S., Sutar M. Finite element modelling and analysis of workpiece-fixture system. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2, Issue. 2. pp. 60–65.
13. Hu S., Liao Y. An integrated model of a fixture–workpiece system for surface quality prediction. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 17. pp. 810–818.
14. Kang Y., Rong Y., Yang J. C. Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. Vol. 21. pp. 842–849.
15. Asante J. N. Effect of fixture compliance and cutting conditions on workpiece stability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 48. pp. 33–43.
16. Cioata V., Kiss I. The machining error due to contact deformation of workpiece-fixture system. *Bulletin of ACTA Technical Engineering*. 2009. pp. 33–36.
17. Zheng, Y. *Finite element analysis for fixture stiffness* : PhD Thesis. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2005. 148 p.

18. Rong Y., Bai Y. Automated generation of modular fixture configuration design. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1997. Vol. 119(2). pp. 208–219.
19. Chou Y.C. Automated fixture design for concurrent manufacturing planning. *Concurrent Engineering: Res. & Appl.* 1993. Vol. 1. pp. 219–229.
20. Wang M. Y. Automated fixture layout design for 3D workpieces. *International Journal of Robotics and Automation*. 1999. no 2. pp. 1577–1582.
21. Rong Y., Hu W., Kang Y. et al. Locating error analysis and tolerance assignment for computer-aided fixture design. *International Journal of Production Research*. 2001. no 39. pp. 3529–3545.
22. Estrems M., Sanchez H. T., Faura F. Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. no21. pp. 384–390.
23. Hou J. L., Trappey A. J. Methodology for applying V-blocks and clamps to non-prismatic workpart fixtures. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 1997. no 10. pp. 152–167.
24. Afzeri K., Konneh M., Sutjipto A. J., Aminanda Y. Optimization of pin type fixture configurations. *International Journal Science Engineering Technology*. 2008. no 1. pp 33–40.
25. Cai W. Robust pin layout design for sheet-panel locating. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. no 28. pp. 486–494.
26. Al-Habaibeh A., Gindy N., Parkin R. M. Experimental design and investigation of a pin-type reconfigurable clamping system for manufacturing aerospace components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2003. no12. pp. 1771–1777.
27. Ivanov V., Dehtiarov I., Karpus V. *Perenalagodzhuvaniy ustanovlyuval'no-zatisknij modul' dlya obrobki detalej tipu vazheliv*. [The transceiver]. Patent UA, no 98925, 2015

*Надійшла (received) 05.02.2018*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Іванов Віталій Олександрович (Иванов Виталий Александрович, Vitalii Ivanov)** – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0595-2660>; e-mail: [ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua)

**Дегтярьов Іван Михайлович (Дегтярев Иван Михайлович, Ivan Dehtiarov)** – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів; м. Суми, Україна

**Залога Вільям Олександрович (Залога Вильям Александрович, Viliam Zaloga)** – доктор технічних наук, професор, Сумський державний університет, завідувач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів; м. Суми, Україна

**Басова Євгенія Володимирівна (Басова Евгения Владимировна, Yevheniia Basova)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8549-4788; e-mail: [e.v.basova.khpi@gmail.com](mailto:e.v.basova.khpi@gmail.com)