

УДК 621:30.050

ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ 3D ДРУКУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВАЖЛИВО-ОБЕРТОВИХ МЕХАНІЗМІВ**В. М. Орел, В. Т. Щетинін, О. О. Ченчева, А. П. Павлюченко, О. Ф. Саленко**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: Salenko2006@ukr.net

Широке застосування методів прототипування в машинобудуванні дає змогу для розвитку модельно-натурної перевірки форм деталей, технічних рішень, оцінки працездатності окремих вузлів та елементів машин. Розглядається питання можливості використання 3D друку в дослідницькій сфері, зокрема, для проведення статичних і динамічних досліджень механічних систем. Основне обмеження в задачі оптимізації визначається величиною деформації зони затвердіння (усадка матеріалу при застиганні), яка впливає на конфігурацію об'єкта. Однак дослідники мають змогу керовано створювати похибки форми та взаємного розташування поверхонь спряжень. Як досліджуваний механізм розглянуто шарнірно-важільний блок приводів верстата (λ -присрій) для гідростурмінного або струминно-лазерного різання. Встановлено похибки відтворення сполучених елементів та оцінено їх вплив на точність роботи механізму. Показано, що проведення модельного дослідження дає більшу точність, оскільки враховується відхилення від ідеальних умов контакту у спряженні.

Ключові слова: 3D друк, похибка, спряження.**О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДСТВ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЫЧАЖНО-ВРАЩАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ****В. Н. Орел, В. Т. Щетинин, О. А. Ченчева, А. П. Павлюченко, А. Ф. Саленко**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: Salenko2006@ukr.net

Широкое применение методов прототипирования в машиностроении дает возможность для развития модельно-натурной проверки форм деталей, технических решений, оценки трудоспособности отдельных узлов и элементов машин. Рассматривается вопрос о возможности использования 3D печати в исследовательской сфере, в частности, для проведения статических и динамических исследований механических систем. Основное ограничение в задаче оптимизации определяется величиной деформации зоны затвердевания (усадка материала при застывании), которая влияет на конфигурацию объекта. Однако исследователи могут управляемо создавать погрешности формы и взаимного расположения поверхностей сопряжений. В качестве исследуемого механизма рассмотрено шарнирно-рычажный блок привод станка (λ -устройство) для гидростурминного или струйно-лазерной резки. Установлено погрешности воспроизведения соединенных элементов, и оценено их влияние на точность работы механизма. Показано, что проведение модельного исследования дает большую точность, так как учитывается отклонение от идеальных условий контакта в сопряжении.

Ключевые слова: 3D печать, погрешность, сопряжения.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. 3D принтери, літографічні пристрої та системи швидкого прототипування, з'явившись наприкінці ХХ століття, активно удосконалюються і розвиваються. Нині за допомогою 3D принтерів вдається виконувати відтворення тривимірних об'єктів як з неметалевих матеріалів (переважно ABS-пластику), так і з металів, кераміки, композитів, у тому числі, двокомпонентних. Засоби 3D друку досить потужно використовуються для модельно-натурної перевірки форм деталей, технічних рішень, оцінки працездатності окремих вузлів та елементів машин. Існує інформація про спроби використання подібних засобів для друку органічних речовин та матеріалів, а також об'єктів будівництва.

Однак цікавим і неоднозначним залишається питання – чи можна 3D друк використовувати в дослідницькій сфері, зокрема, для проведення статичних і динамічних досліджень механічних систем і чи є в цьому доцільність.

Зазначене питання обумовлене перед усім тим, що сучасне машинобудування характеризується рядом особливостей і протиріч, серед яких головними є наступні:

- значне зростання частки інформаційної складової технологій машинобудування, перш за все, прогресивних та інновативних;
- висока гнучкість та швидка переналаджувальність, поєднана з необхідністю ефективної роботи у багатосерійному та масовому виробництві;
- підвищення точності та прецизійності обробки з одночасним зниженням матеріалоемності, ваги та інших характеристики виробу;
- підвищення стабільності фізико-механічних властивостей, вихідних характеристик об'єкту при збереженні простоти, дешевизни та легкості утилізації;
- використання нових конструкційних і різальних матеріалів, принципів і методів обробки; розширення обсягів та сфер використання неметалевих композитів.

Звідси також стає очевидною перспективність використання засобів 3D друку для виробництва як окремих елементів машин і механізмів, так і механічних виробів у цілому.

Основні результати досліджень сучасного обробного обладнання, силових вузлів та пристроїв робочої подачі, механізмів орієнтування деталі та ін-

струменту, зокрема, механізмів із паралельними кінематичними ланцюгами, висвітлено в роботах провідних науковців, серед яких найбільш вагомими є роботи В. Струтинського, Ю. Кузнєцова, Ю. Подурарева, И. Крижанівського, S. Chen, F. Gao, L. Kubler, X. Tang та ін. [1–4]. Однак дослідниками так і не було вирішено низку питань, які б дозволили максимально повно враховувати наведені вище особливості сучасного машинобудування, а саме:

– не враховано перспективність використання для силових елементів, важелів і штанг анізотропних матеріалів, перед усім, неметалевих композитів та армованих сполучень;

– не повною мірою враховуються похибки форми та відхилення від правильного взаємного розташування сполучених поверхонь і елементів; враховуються лише похибки простих геометричних форм і неточності, віднесені до базової системи координат, що вносить значні обмеження на використання прогнозних розрахунків вихідних параметрів точності механізмів у цілому;

– не враховуються також непрогнозовані або складно прогнозовані явища плинних пружно-пластичних деформувань елементів механічних систем під робочим навантаженням, процеси старіння як втрати фізико-механічних характеристик елементів і ланок механізмів, умов сполучень і контактів, станів головних спряжень.

Отже, оцінка можливостей використання 3D засобів для виготовлення елементів важільних та обертових механізмів є актуальною та значимою задачею, оскільки відкриває нові можливості у постановці та проведенні реальних, а не модельно-комп'ютерних досліджень, сприяє скороченню часу на їх реалізацію.

Мета роботи – оцінити можливості та визначити точність прогнозованих статичних та динамічних похибок важільних систем, використовуваних у верстатному обладнанні, на основі використання модельних засобів, побудованих із використанням елементів, виготовлених методом 3D друку.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Відомо, що існуючі способи відтворення тривимірних об'єктів складної [5] конфігурації забезпечують різну геометричну точність і шорсткість поверхні, причому ці параметри залежать від конструкції самої деталі, режимів формоутворення і розміру (площі) джерела локального затвердіння.

Досягнення заданої геометричної точності і високої продуктивності формоутворення можливо тільки при призначенні оптимальних режимів. Основними змінними процесу є: V_v – швидкість руху джерела локального затвердіння, h_v – висота шару, отриманого за один прохід, d_u – площа плями затвердіння, яка є функцією від V_u при використанні таких технологій, як SLA (стереолітографія), SLS (лазерне спікання), FDM (рідке видавлювання) і не залежить від V_u при використанні LOM (виробництво шаруватих об'єктів) та BPM (виробництво з використанням балістики). Продуктивність процесу Π за [6] визначається виразом:

$$\Pi = V_u \cdot d_u \cdot h_u, \quad (1)$$

а функція мети задачі оптимізації розраховується за формулою:

$$\Phi = \frac{1}{V_u \cdot d_u \cdot h_u}, \quad (2)$$

фізичний зміст якої – основний час операції.

Основне обмеження в задачі оптимізації визначається величиною деформації зони затвердіння, яка виникає у зв'язку з тим, що при затвердінні матеріалу відбувається його усадка, що викликає внутрішні напруження і відповідні деформації елемента, так пов'язаних із ним сусідніх обсягів, тобто похибки форми у традиційних технологіях розглядаються як негативний наслідок процесу, що виникає із-за повільно плинних процесів термічної стабілізації деталі, і його поглиблене вивчення важливе лише як основа для розробки прийомів уникнення дефекту і підвищення продуктивності.

Відповідно до методики RP-технологій деталь виготовляється пошарово; зовнішні форми фігури формуються як окремі площини, між якими відбувається укладання підтримок різного типу та способу виконання.

У даному прикладі розглядається технологія, яка потребує підтримки структур (SLS), при використанні інших технологій, наприклад SLA, 3D модель доповнюється підтримкою для нависаючих об'єктів, що ускладнює конструкцію, але надає їй необхідної жорсткості. Тоді задачу оптимізації необхідно скоригувати з урахуванням збільшення питомих напружень після видалення додаткових опор.

При затвердінні шарів у мікрооб'ємах матеріалу виникають дотичні напруження, що деформують шари. Наростання напружень відбувається нерівномірно і повторює маршрут руху плями затвердіння. Для визначення величин деформацій для шару завтовшки h , на поверхні якого діють дотичні напруження τ_{xy} . Величина цих напружень повністю описується бігармонійною функцією $\Phi = 1/(6\pi x)z^3$, що задовольняє рівнянням рівноваги і спільності механіки суцільного середовища.

Розподіл дотичних напружень по глибині шару при інтенсивності зовнішнього впливу в Q_τ визначається виразом:

$$\tau_{xy}(z) = -\frac{d^2\varphi}{dx \cdot dz} = \frac{1}{h^2} \cdot Q_\tau \cdot z^2, \quad (3)$$

де інтенсивність в Q_τ визначається як:

$$Q_\tau = d_U^2 \cdot W, \quad (4)$$

а W – потужність джерела полімеризації.

Деформації виникають при $\tau_{xy} \geq [\tau_C]$, де $[\tau_C]$ – зсувні напруження, які залежить від матеріалу і конструкції деталі. Граничні напруження тривалої міцності нижче гранично допустимих, тому в напружених деталях часто спостерігається деформація по закінченні 1–5 тижнів після виробництва.

Відповідні даному напруженому стану величини деформацій шару завтовшки h визначаємо з виразу:

$$U_{xz} = \frac{Q_z}{4\pi} \left[\left(\frac{\lambda + 3G}{\pi + G} + \frac{X^2}{Y^2} \right) \frac{1}{RG} - \frac{1}{(\lambda + G)R} + \left(1 - \frac{X^2}{R(R+Z)} \right) \frac{1}{(\lambda + G)(R+G)} \right], \quad (5)$$

де

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}; G = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

E – модуль пружності матеріалу виробу; ν – коефіцієнт Пуассона.

Деформації U_{xz} кожного шару в кінцевому підсумку створюють геометричні відхилення створюваного об'єкта в цілому. Нехай методом 3D друку формується втулка (рис. 1). Зовнішній і внутрішній розміри, задані кресленням D і d , відрізняються від реальних D_p і d_p на величину U_{xz} , що виникає в кожному шарі.

Поступове викладання шарів та встановлення проміжних підпорок дозволяє забезпечити різномірний друк та виконувати додаткові елементи в втулці: площини стикування, важільні елементи, сполучені отвори та ін.

При цьому встановлено, що способи укладання підкріплюючих шарів впливають на точність відтворення форм та якість сформованої поверхні при викладанні.

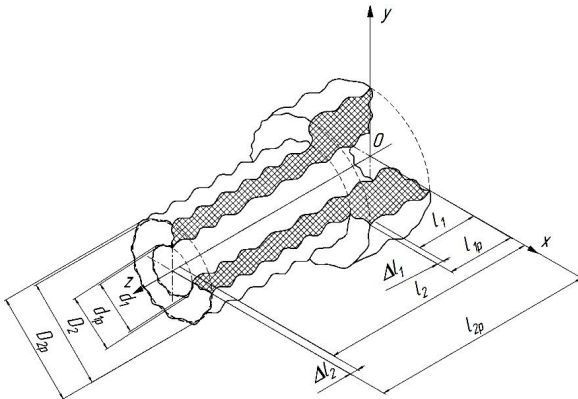


Рисунок 1 – Похибки (а), що виникають при виготовленні 3D моделі

При сполученні елементів, створених методом 3D друку, їх контакт відбуватиметься не за гіпотетичними поверхнями (циліндричними, плоскими), а лише у певних контактуючих точках; при цьому похибки форми можуть підсилити прояв деформувань у місці контакту, знизивши жорсткість системи у місці сполучення.

Результати досліджень. Розглянемо розрахункову схему рис. 2. Нехай контактуюча пара є плоскими пластинками розмірами $b \times l$, стискувані силою R . Контакт поверхонь відбувається у точках K_1-K_i , до яких можна встановити орт по дотичній поверхні контакту n_1-n_i .

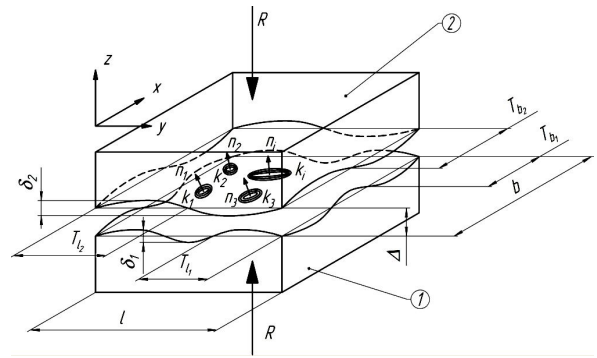


Рисунок 2 – Розрахункова схема контакту двох плоских пластин

Оскільки як при механічній, так і при будь-якій обробці профіль поверхні є періодичним із кроками $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$. Унаслідок дії сили F контактні деформації охоплюють зони контактів та ведуть до зближення поверхонь на величину Δ_i . Переміщення уздовж орта може бути визначено наближено відповідно до задачі Герца:

$$\Delta_i = \frac{a_i^2}{R_{1,2i}}, \quad (6)$$

де радіус фрагментів R_{1i}, R_{2i} контактуючих поверхонь визначається із амплітуди відхилення від теоретичної лінії профілю δ_i , a_i визначається за умови контакту двох напівсфер:

$$a = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{6FR_1R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (7)$$

де ν_1, ν_2, E_1, E_2 – коефіцієнти Пуассона та модулі пружності матеріалів у зоні контакту відповідно; за умови що поверхні контакту віддруковані на принтері із одного матеріалу множник під радикалом становитиме $\frac{2}{\epsilon}(1-\nu^2)$. При цьому розподіл напружень у зоні контакту відповідатиме

$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}, \quad (8)$$

де $p_0 = \frac{3F}{2\pi a^2}$, $r^2 = x^2 + y^2$. Рівнем шорсткості у зоні контакту нехтуємо, оскільки головну увагу звернуто саме на макрогеометричні похибки відтворення форми.

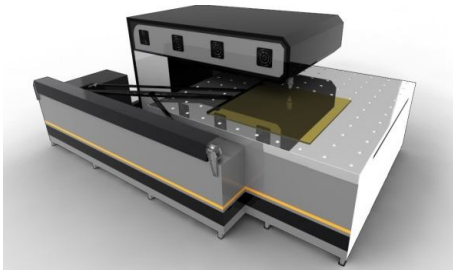
Розподіл навантажень між окремими виступами контактуючих поверхонь вважаємо рівномірним, однак таким, що залежить від кількості точок контакту.

Таким чином, разом із (5), зміна зміщення елементів між собою внаслідок виникнення деформацій від навантаження може відбуватися кожного разу, коли змінюватимуться умови контакту. Наприклад, при наданні відносного руху виступи та заглиблення однієї поверхні відносно іншої будуть періодично змінюватися, відповідно змінюватимуться і величини деформацій.

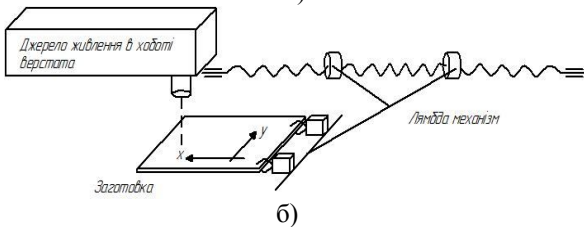
Оскільки 3D друк має можливість шутчно створювати певний мікрорельєф поверхні, а використано

вуваний пластик не володіє високим модулем пружності E , оцінка виникаючих похибок в прототипах механізмів, надрукованих на 3D принтерах, може бути здійснена на основі перерахунку за коефіцієнтами приведення.

Як досліджуваний механізм обрано шарнірно-важільний блок приводів верстата для гідроструминного або струминно-лазерного різання [7], що є λ -пристроєм, працюючим у декартовій системі координат (рис. 3).



а)



б)

Рисунок 3 – Фотореалістичне зображення верстата для гідроструминного оброблення із викоремленим блоком приводів подачі заготовки (а) та його схема (б)

Попри очевидні переваги пропонованого компонування верстата та використання окремого блоку приводів подачі, подібні механізми володіють сингулярністю та обмеженою жорсткістю внаслідок наявності довгих силових важелів. Шарніри механізмів є високонавантаженими і такими, що вносять істотну похибку у точність відпрацювання переміщень, що і обумовлює необхідність проведення досліджень із статичної та динамічної точності системи.

Відомо [7], що для механізмів з замкнутими кінематичними ланцюгами має місце особливе положення першого типу, що характеризується виродженням матриці Якобі, яка представляє собою відношення похідних швидкостей приводів до зміни координат положення робочого органа:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{d}{dx} q_1(x, y) & \frac{d}{dy} q_1(x, y) \\ \frac{d}{dx} q_2(x, y) & \frac{d}{dy} q_2(x, y) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

звідси:

$$|J| = \frac{d}{dx} q_1(x, y) \cdot \frac{d}{dy} q_2(x, y) - \frac{d}{dy} q_1(x, y) \cdot \frac{d}{dx} q_2(x, y), \quad (10)$$

де $q_1(x, y)$ та $q_2(x, y)$ – величини переміщень приводів, розраховані при кінематичному аналізі механізмів.

Механізми з замкнутими кінематичними ланцюгами володіють особливим положенням другого типу [7].

В аналізованому механізмі «лямбда» сингулярність спостерігається лише на краях робочої зони. Положення повзунів визначаються за формулами:

$$q_1(x, y) = x - \sqrt{L_1^2 - y^2}, \quad (11)$$

$$q_2(x, y) = L_3 - \sqrt{1 - \frac{y^2}{L_1^2}} + q_1(x, y) + \frac{L_3 y}{L_1}, \quad (12)$$

де x та y – координати положення виконавчого органа, мм; L_1 ; L_2 ; L_3 – геометричні параметри механізму, мм; q_1 та q_2 – положення повзунів, мм.

Похідні від величин переміщень приводів повзунів мають вигляд: $\frac{d}{dx} q_1(x, y) = 1$; $\frac{d}{dx} q_2(x, y) = 1$;

$$\frac{d}{dy} q_1(x, y) = \frac{y}{\sqrt{L_1^2 - y^2}};$$

$$\frac{d}{dy} q_2(x, y) = \frac{y}{\sqrt{L_1^2 - y^2}} + \frac{L_3}{L_1} - \frac{L_3 \cdot y}{L_1^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{L_1^2}}}.$$

Тож на основі (10) матимемо:

$$|J| = \left[\frac{y}{\sqrt{L_1^2 - y^2}} + \frac{L_3}{L_1} - \frac{L_3 \cdot y}{L_1^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{L_1^2}}} \right] - \left(\frac{y}{\sqrt{L_1^2 - y^2}} \right). \quad (13)$$

Для моделювання важільного механізму скористалися наявними елементами матричних принтерів EPSON FX1050, у тому числі, кроковими двигунами, встановленими на стандартні каретки, що дозволило мінімізувати похибки, які вносяться елементами приводу та електродвигунами. Приводи змонтували паралельно на базовій плиті, зі зміщенням, щоб забезпечити розрахункову схему відповідно до рис. 4,а. Для такого конструктивного рішення існують наступні умови та обмеження:

– максимальне значення робочого простору B визначається використаними важелями і становить $B = l_1 + l_2$;

– довжина простору із урахуванням робочого ходу уздовж вісі OX на величину s_x має бути не меншою за $T = \sqrt{l_1^2 - h^2} + l_3 + s_x$, причому $l_1 = l_3 + h$. Тоді можна записати значення відповідних координат за осями OX та OY :

$$x_{min} = \sqrt{l_1^2 - h^2} + l_3; \quad x_{max} = \sqrt{l_1^2 - h^2} + l_3 + s_x;$$

$$y_{min} = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 - (\sqrt{l_1^2 - h^2} + l_3)^2}; \quad y_{max} = l_1 + l_2.$$

За умови необхідності уникнення сингулярності та наближення до зон сингулярності дійсні значення переміщень за осями будуть меншими: $s_x' = s_x - 2T_x'$; $s_y' = s_y - 2T_y'$.

При цьому припускали, що $T_x' = T_x''$; $T_y' = T_y''$.

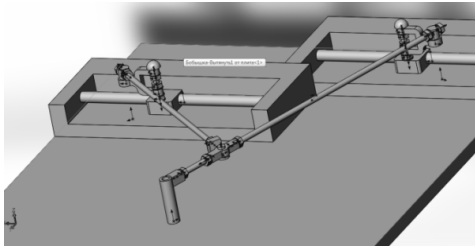
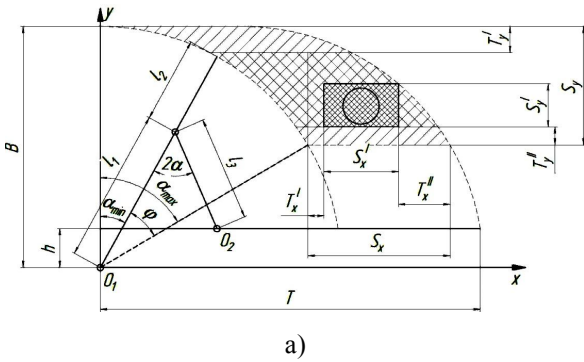


Рисунок 4 – Розрахункова схема (а), модель (б) та фото (в) дослідного стенду, створеного для оцінки точності прогнозування похибок важільного механізму

За результатами, отриманими в [6], стає очевидним, що уникнення впливу предзон сингулярності та, відповідно, додаткових похибок при переміщенні можливе, якщо обмежувати повний хід 75–80 %. Звідси кути α_{min} , α_{max} становитимуть:

$$a_{min} = a \sin \left[\frac{L - \sqrt{L^2 - (\sqrt{l_1^2 - h^2} + l_3)^2}}{CL} \right]$$

$$a_{max} = \frac{\pi}{2} - a \sin \left[\frac{h + L - \sqrt{L^2 - (\sqrt{l_1^2 - h^2} + l_3)^2}}{CL} \right]$$

де C – коефіцієнт, що враховує зменшення величини реального переміщення, $C=0,1 \dots 0,15$.

Таким чином, у вузлах O_1 та O_2 кут повороту в шарнірі становить $\varphi = \alpha_{max} - \alpha_{min}$, а у вузлі 1 – відповідно 2φ (за умови симетричності положення

ланок механізму l_1 та l_3 відносно вісі OY). Отже, площа переміщення у спряженні контакту становитиме

$$s_k = \pi r \varphi \cdot H_w, \tag{14}$$

де H_w – висота шарніру.

Таким чином, були отримані усі необхідні параметри зони контакту та виконані відповідні розрахунки похибки, яку може вносити сполучення важільного механізму в його роботу.

Для оцінки точності параметрів розрахунку досліджено похибки, що проявлялися при друкуванні кінцевиків важелів та втулок опор макету важільного та обертового механізмів, які досліджували іншими теоретичними та модельними методами. При цьому друком були закладені дефекти форми та взаємного розташування, які легко виміряти традиційними мірильними засобами (мікрометром, оптичним інструментальним мікроскопом та ін.).

Отримані деталі (рис. 5) були перевірені на відповідність заданим розмірам, результати були зведені до табл. 1.

Таблиця 1 – Закладені та виниклі похибки та відхилення деталей, виконаних 3D друком

Заданий розмір, мм	Отриманий розмір, мм	Похибка, мм	Відхилення у %	Відхилення форми, мм	
Деталь А	8	7,74	0,26	3,25	0,03
	10	9,69	0,31	3,1	0,39
	16	15,81	0,19	1,2	0,06
Деталь Б	8	7,67	0,33	4,2	0,24
	10	9,78	0,22	2,2	0,04
	56	55,62	0,38	0,67	0,5
Деталь В	13	12,63	0,37	2,8	0,45
	9,6	9,36	0,24	2,5	0,02
	23	22,70	0,30	1,3	0,36

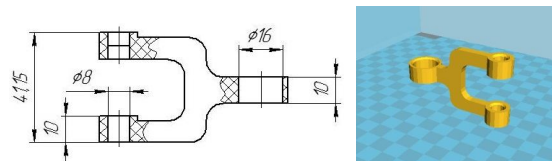


Рисунок 5 – Креслення (а), модель (б) та деталі (в) стенду, отримані на 3D принтері

Точність відтвореного на стенді рис. 4, в контуру оцінювали за відхиленням реальної траєкторії, ви-

значеної за допомогою оптичного маркера на світлочутливому фотопапері, від гіпотетичної, та порівнювали із розрахованими значеннями похибок.

При оцінці точності моделювання та реального виконання контуру за правильним колом діам. 100 мм встановлено таке (рис. 6). Моделювання виходу на точку при обході контуру діаметром 100 мм має помилку позиціонування у радіальному напрямку, яка підкоряється гармонійному закону, із чітко вираженим ексцентриситетом за восьмим променем; при цьому коливання помилки відтворення заданої точки пов'язані з тим, що існує кінцева жорсткість кінематичного ланцюга від приводу (крокового мотору) до робочого органу (уявної призми із верхівкою).

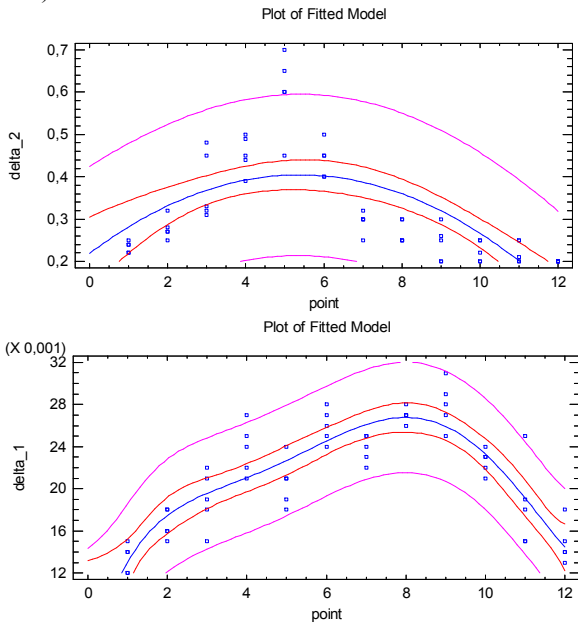


Рисунок 6 – Похибки відтворення контуру при моделюванні та відхилення профілю кола $\varnothing 100,0$ мм від гіпотетичного

У той же час реальне відтворення контуру за допомогою важільного механізму із синтезованими елементами показало наступне (рис. 7). Реальний ексцентриситет виявився за п'ятим променем, однак відхилення контуру від очікуваного значення мало значно більшу дисперсію, зокрема, із урахуванням масштабного коефіцієнту (збільшення просторових відхилень порівняно із кресленням становило 5,0 разів). Тоді для математичного моделювання $y_t=0,0032$ мм, для реального важільного механізму – до 0,018 мм. При цьому реальна величина відхилення контуру від гіпотетичного склала до 0,65 мм, при очікуваному значенні 0,15 мм. При цьому самі помилки контуру мають істотну не лінійність, очевидно, обумовлену гістерезисними явищами у счленуваннях.

Отже, використання 3D-моделювання дозволяє більш точно прогнозувати похибки обходу контуру і потребує додаткових досліджень з метою виявлення закономірностей впливу окремих технологічних чинників формування деталей на похибки при відтворенні.

Також встановлено, що між результатами моделювання та відтворення контуру за допомогою син-

тезованих засобів счленування важільних механізмів існує слабкий кореляційний зв'язок, коефіцієнт кореляції становить $R=0,42$.

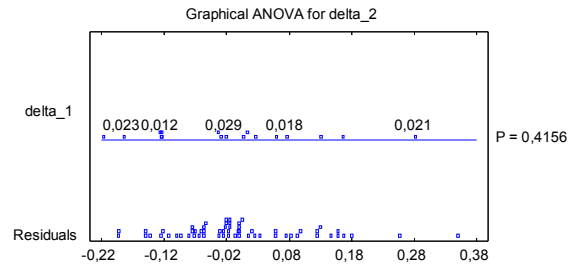


Рисунок 7 – Результати дисперсійного аналізу даних похибок, отриманих моделюванням та при реальних вимірах

Таблиця 2 – Порівняння результатів теоретичного та експериментального дослідження

Досліджувані похибки	Розрахункове значення	Математичне моделювання	Стендове моделювання
Точність	до 0,4 мм	до 0,4 мм	до 1,2 мм
Динамічні відхилення	–	–	від 0,2 до 0,4 мм
Відхилення форми	до 0,05 мм	від 0,08 до 0,5 мм	від 0,3 до 1,5 мм

ВИСНОВКИ. В результаті проведеного комплексу теоретико-експериментальних досліджень виконана оцінка можливості використання 3D друку з АВС пластику для прототипування елементів сполучення важелів у механізмах переміщення та позиціонування робочих органів верстатів. Встановлено, що нахилом робочого столу, температурою плавлення пластику та орієнтацією друкувальної головки можливе створення певних похибок форми елементів виробу, зокрема, відхилення від круглості до 0,08 мм, відхилення від перпендикулярності до 0,5 мм на довжині до 50 мм.

На основі вимірів отриманих відхилень встановлені функціональні залежності для прогнозування похибок залежно від прийнятих до уваги чинників.

На основі важільного механізму типу лямбда виконано оцінку точності виходу в точку та відпрацювання переміщень по заданій траєкторії. Результати похибок порівняли із модельними даними. Встановлено, що використання засобів 3D друку дозволило виявити існування нелінійностей у появі похибок, які не були визначені при математичному моделюванні.

Таким чином, використання прототипів для дослідження важільних механізмів дозволило виявити зони максимальних похибок та отримати залежності для прогнозування точності робочих переміщень реального верстата.

ЛІТЕРАТУРА

1. Струтинський В.Б. Техніка та технологія гідроструминної обробки: монографія. – К.: ВІПОЛ, 1996. – 282 с.

2. Кузнецов Ю.Н., Дмитриев Д.А. Концепция гибридных компоновок станков с параллельной кинематикой на модульном принципе // *Материалы Междунар. науч. конф. «Техника, технологии и системы Tekhsis 2009»*. – Plovdiv: Technical University Sofia, 2009. – PP. 19–36.

3. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: навчальний посібник для ВНЗ / Під ред. Ю.М. Кузнецов – Кіровоград, 2004. – 449 с.

4. Richerzhagen I., Delacrtaz G., Salath R.P. Complete Model to Simulate the Thermal Defocusing of a Laser Beam Focused in Water // *Optical Engineering*. – 1996. – Vol. 35, no. 7. – PP. 2058–2066.

5. Грабченко А.И., Внуков Ю.Н., Доброскок В.Л. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие для ВУЗ / Под ред. Грабченко А.И. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.

6. Торлин В.Н., Фалалеев А.П., Мешков В.В., Огрызков С.В. Управление процессом формообразования при изготовлении деталей методами быстрого прототипирования // *Вестник СевГТУ*. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. – Вып. 36. – С. 63–66.

7. Розширення технологічних можливостей гідро струминного обладнання на основі нових компонентувальних рішень / О.Ф. Саленко, В.М. Орел // *Вісник Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*. – 2014. – Вип. 1/2014 (84). – С. 160–168.

ABOUT PRACTICABILITY OF THE USE MEANS OF 3D PRINTING FOR IMPROVE THE ACCURACY OF STATICAL AND DYNAMICAL RESEARCHES LEVER ROTATIONAL MECHANISM

V. Orel, V. Shchetinin, O.Chencheva, A. Pavlyuchenko, O. Salenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: Salenko2006@ukr.net

Widespread use of prototyping methods in mechanical engineering enables the development of full-sized model checking forms parts, technical solutions, assess working efficiency of individual components and machine elements. Discusses the possibility of using 3D printing in the field of research, in particular, for the static and dynamic research of mechaical systems. The main limitation to the optimization problem is determined by the magnitude of deformation zone of solidification (shrinkage of the material during solidification), which affects the configuration of the object. However, researchers can controllably create imprecision of form and the mutual disposition of surfaces of the conjugation. As researched mechanism examined hinged lever unit of drive machine-tool (λ -appliance) for water jet or water jet guided laser cutting. Established imprecision of reproduction connected elements and assess their influence on the accuracy of the mechanism. It is shown that the holding a model research gives greater accuracy, as is taken into account the deviation from the ideal conditions of contact in conjugation.

Key words: 3D printing, imprecision, conjugation

REFERENCES

1. Strutinskiy, V.B. (1996). *Tekhnika ta tekhnologiya gidrosluminnoi obrobky* [Hydro-jet technique and technology], VIPOL, Kviv, Ukraine.

2. Kuznetsov, Yu.N., and Dmitriyev, D.A., (2009), "Concept of hybrid configurations with parallel kinematics machines on a modular principle", *Tekhnika, tekhnologii i sistumy, Tekhsis 2009, Int. sci. conf. proc.*, Technical University Sofia, Plovdiv, pp. 19–36.

3. Kryzhanivsky V.A., Valiavskiy I.A., Kuznetsov, Yu.N. (2004) *Tehnologichne obladnannia z paralelnoyu kinematykoyu: navchalnyi posibnyk dlia VNZ* [Production equipment with parallel kinematics: education textbooks], ed. Kuznetsov Yu.M., Kirovograd, Ukraine.

4. Richerzhagen I., Delacrtaz G., Salath R.P., (1996), «Complete Model to Simulate the Thermal Defocusing of a Laser Beam Focused in Water», *Optical Engineering*, vol. 35, no. 7, pp. 2058–2066.

5. Grabchenko A.I., Vnukov J.N., Dobroskok V.L. (2011), *Integrirovannye generativnye tehnologii uchebnoe posobie dlia VUZ* [Integrated generative technology: education textbooks]ned. Grabchenko A.I., Kharkiv, Ukraine.

6. Torlin V.N., Falaleev A.P., Meshkov V.V., Oгрыzков S.V. (2002) «Managing the process of formation in the manufacture of parts by rapid prototyping»б, *Transaction of SevNTU*, Izd-vo SevNTU, Sevastopol, iss. 36: pp. 63–66.

7. Salenko O.F., Orel V.M., (2014), «Enhancing technological capabilities of hydrojetting equipment based on new layout solutions», *Transaction of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 1 (84), pp. 160–168.

Стаття надійшла 27.02.2015.