

УДК 621.9.06

С.А. РУСАНОВ, Д.О. ДМИТРІЄВ, В.В. РАЧИНСЬКИЙ  
Херсонський національний технічний університет**ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ОБЛАДНАННЯ КАРКАСНИХ КОМПОНОВОК В УМОВАХ СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ОБРОБЦІ СКЛАДНИХ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ**

*В статті наведено розроблений метод і результати оцінки напружено-деформованого стану верстатного та технологічного обладнання каркасних компоновок, що побудовано із застосуванням просторових шарнірно-стрижневих механізмів паралельної структури. Розглянуто технічну і технологічну здатність каркасних компоновок в умовах силового навантаження до застосування на фінішних операціях обробки складнопрофільних деталей і поверхонь методами поверхневого пластичного деформування.*

*Ключові слова: каркасні компоновки, силове навантаження, механізми паралельної структури, методи поверхневого пластичного деформування*

С.А. РУСАНОВ, Д.О. ДМИТРІЄВ, В.В. РАЧИНСЬКИЙ  
Херсонський національний технічний університет**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ КАРКАСНЫХ КОМПОНОВОК В УСЛОВИЯХ СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

*В статье приведены метод и результаты оценки напряженно-деформированного состояния станочного и технологического оборудования каркасных компоновок, на основе пространственных шарнирно-стержневых механизмов параллельной структуры. Рассмотрены техническая и технологическая работоспособность каркасных компоновок в условиях силовой нагрузки и предпосылки его применения на финишных операциях обработки сложнопрофильных деталей и поверхностей методами поверхностного пластического деформирования.*

*Ключевые слова: каркасные компоновки, силовая нагрузка, механизмы параллельной структуры, методы поверхностного пластического деформирования*

S.A. RUSANOV, D.O. DMYTRIEV, V.V. RACHINSKIY  
Kherson National Technical University**PERFORMANCE THE EQUIPMENT FRAME LAYOUT IN TERMS OF POWER LOADING IN THE PROCESSING OF FIGURINE PARTS BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION**

*The article presents the method and results of evaluation of elastic stress transfer machines and technological equipment for frame layouts based on the spatial hinge-rod mechanisms of parallel structure. Reviewed technical and technological performance of frame layouts in terms of weight training and background of its application in a finishing operation of processing of figurine parts and surfaces methods of surface plastic deformation.*

*Keywords: frame layout, power load, mechanisms of parallel structure, methods of surface plastic deformation*

**Постановка проблеми**

Поверхнєве пластичне деформування (ППД) використовують для підвищення опору втомі й твердості поверхневого шару металу, а також для формування в цьому шарі внутрішніх напруг (головним чином напруг стиску) і утворенню регламентованого рельєфу мікронерівностей на поверхні [1, 2]. Для статичних методів ППД (зокрема, накатці та вигладжування) використовують універсальне або спеціальне металооброблювальне обладнання, в тому числі з ЧПК. В роботі розглянуто можливість використання для багатокординатних процесів ППД просторових шарнірно-стрижневих механізмів з паралельною структурою (МПС) [3]. Для такого обладнання постає проблема забезпечення необхідного рівня жорсткості (податливості) технологічної системи і, до того ж, розширення функціональних можливостей робочого органу, наприклад збільшення ступенів вільності, швидкості, робочого простору, гнучкості для обробки ППД складно-профільних поверхонь.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Розрахункові питання стосовно до ППД розглядалися достатньо широко [1, 2, 4, 9]. В

перспективі застосування верстатів з МПС основним є попереднє визначення характерних зусиль в процесі обробки у зв'язку з необхідністю орієнтування шарнірних механізмів у просторі в локаціях з найвищою жорсткістю паралельної структури. В [1] наводяться орієнтовні значення вказаних зусиль, що можуть бути знайдені за залежністю:

$$P = 2a^2\sigma_T,$$

де  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу, що зміцнюється;  $a$  – глибина наклепу, в практиці прийнято  $0,02R_3 \leq a \leq 0,1R_3$ ;  $R_3$  – радіус поперечного перерізу деталі.

Для уточнення силових факторів в процесі обробки необхідно розглядати модель «оброблювана деталь – інструмент» в цілому. Розрахункова схема для такої моделі, що розглядається в [4, 8], представлена на рис. 1. На відміну від прямої токарної обробки точінням (рис. 1, а) при токарній обробці з використанням ППД підпружиненим роликом в схему вводяться додаткові пружності  $C_{рол}$  системи ролик-супорт та відповідні значення зовнішніх сил  $P_p$  і  $P_{ХП}$  з боку ролика з доданням маси  $m_p$  (рис. 1, б). При аналізі динамічної моделі по вказаній схемі необхідно враховувати спадковість від точіння, що буде впливати на якість поверхні – її шорсткість з врахуванням отриманих розмірів та форми обробленої довгомірної деталі в поздовжньому і поперечному перетинах.

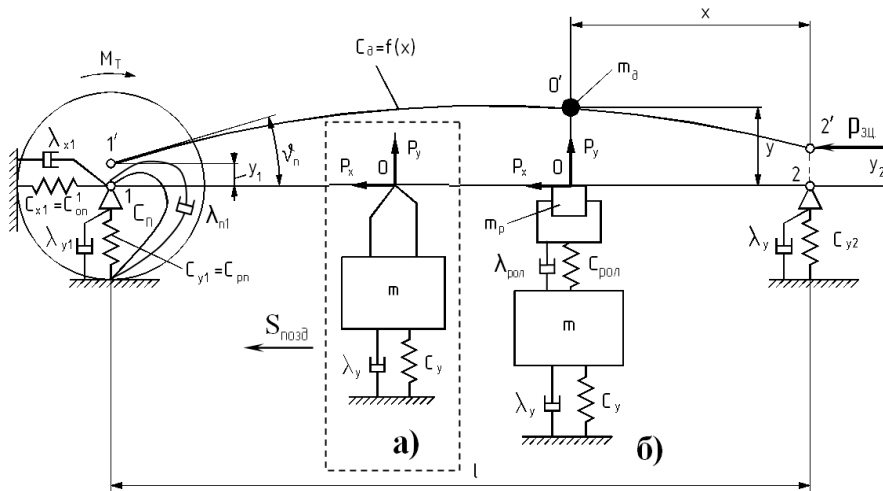


Рис. 1. Спрощена динамічна модель процесу токарної обробки:  
а) – точінням, б) - з використанням ППД

Пружна лінія вісі циліндричної деталі, що навантажена поперечною  $P_y$  і поздовжньою  $P_x$  силами притискання для класичної схеми закріплення (жорстке защемлення в затискному патроні і вільне з іншого боку) згідно з теорією опору матеріалів при поздовжньо-поперечному згині в статичі буде визначатися за формулою [5]:

$$y_c = \frac{P_y l}{2P_x} \left[ \frac{\sin \alpha x}{\alpha l} - \frac{x}{l} + \frac{1 - \cos \frac{\alpha(l-x)}{2}}{\alpha l \sin \frac{\alpha(l-x)}{2}} (1 - \cos \alpha x) \right], \quad (1)$$

де  $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$ ;  $\alpha = \sqrt{\frac{P_x}{EI_x}}$ ;  $E$  - модуль пружності;  $I_x = \frac{\pi d^4}{64}$  – момент інерції поперечного перерізу вала діаметром  $d$ .

#### Формулювання мети дослідження

Для подальшого аналізу можливостей застосування верстатів з МПС для ППД необхідно проаналізувати зворотній зв'язок в системі «деталь – інструмент – просторова структура верстату з МПС» з врахуванням обмежень, що накладає компонетика обладнання на жорсткісні характеристики та параметри рухливості. Таким чином метою дослідження є оціночне формулювання силових навантажень від інструменту з врахуванням випадкових коливань параметрів обробки, якісна оцінка відклику просторової паралельної структури на прикладі верстату СФВПК-4 з МПС та кількісні порівняльні розрахунки відклику різних просторових структур за моделями та алгоритмами авторської лінійки програмних продуктів Tools Glide [6], Tools Response та Tools Apps [7].

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Відхилення від ідеальної форми заготовки дають додаткові навантаження на інструмент, що

формує вектор навантажень  $\mathbf{P}+\Delta\mathbf{P}$  (рис. 2).

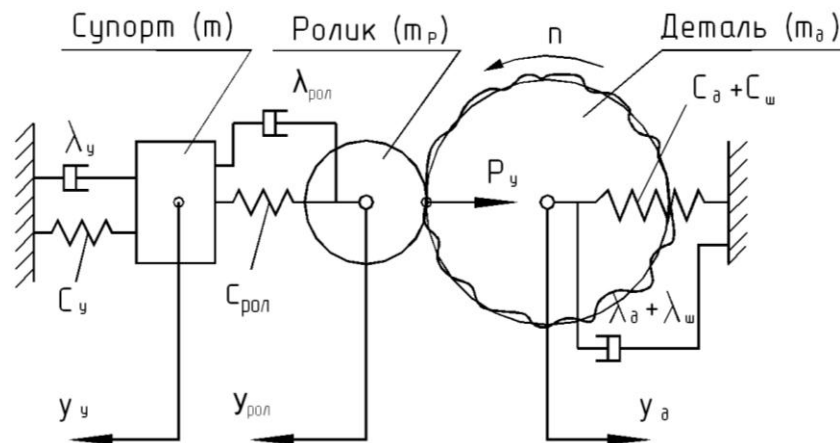


Рис. 2. Спрощена динамічна модель пружної системи супорт-ролик-деталь при токарній обробці з використанням ППД

Для оцінки геометрії (по формі і розміру) деталі, що оброблюється після точіння, необхідно враховувати випадкові фактори при формуванні математичних моделей. При заданих коефіцієнтах нерівномірності радіальної  $\delta C_p$  і поворотної  $\delta C_{II}$  жорсткості затискного патрона [8] розмах їх максимальних значень становить:

$$\Delta C_p = \Delta C_{y1} = 2C_p \frac{\delta C_p}{2 - \delta C_p}, \quad (2)$$

$$\Delta C_{II} = 2C_{II} \frac{\delta C_{II}}{2 - \delta C_{II}}. \quad (3)$$

В результаті виникає додатковий припуск на обробку, який визначається нерівномірностями радіальної  $\Delta C_p$  і поворотної  $\Delta C_{II}$  жорсткості, нерівномірністю жорсткості супорта  $\Delta C_y$ , відхиленням від круглості заготовки  $\delta d$  та її радіальним биттям (ексцентричністю)  $\Delta p$ :

$$\delta y = \delta y_p + \delta y_m + \delta y_{syn} + \frac{\delta d}{2} + \frac{\Delta p}{2}, \quad (4)$$

де  $\delta y_p = P_y \frac{\Delta C_p}{C_p^2}$ ;  $\delta y_m = \frac{P_y \Delta C_{II} (l-x)}{C_{II}^2}$ ;  $\delta y_{syn} = P_y \frac{\Delta C_y}{\Delta C_y^2}$ .

Після підстановки отримаємо:

$$\delta y = P_y \left[ \frac{\Delta C_p}{C_p^2} + \frac{\Delta C_{II} (l-x)}{C_{II}^2} + \frac{\Delta C_y}{C_y^2} \right] + \frac{\delta d + \Delta p}{2}. \quad (5)$$

Випадкові коливання  $\delta y$  призведуть до розмаху сили різання з амплітудою:

$$\Delta P_{y0} = P_{y_{max}} - P_{y_{min}} = B_p \left[ (t + \delta y)^{y_p} - t^{y_p} \right], \quad (6)$$

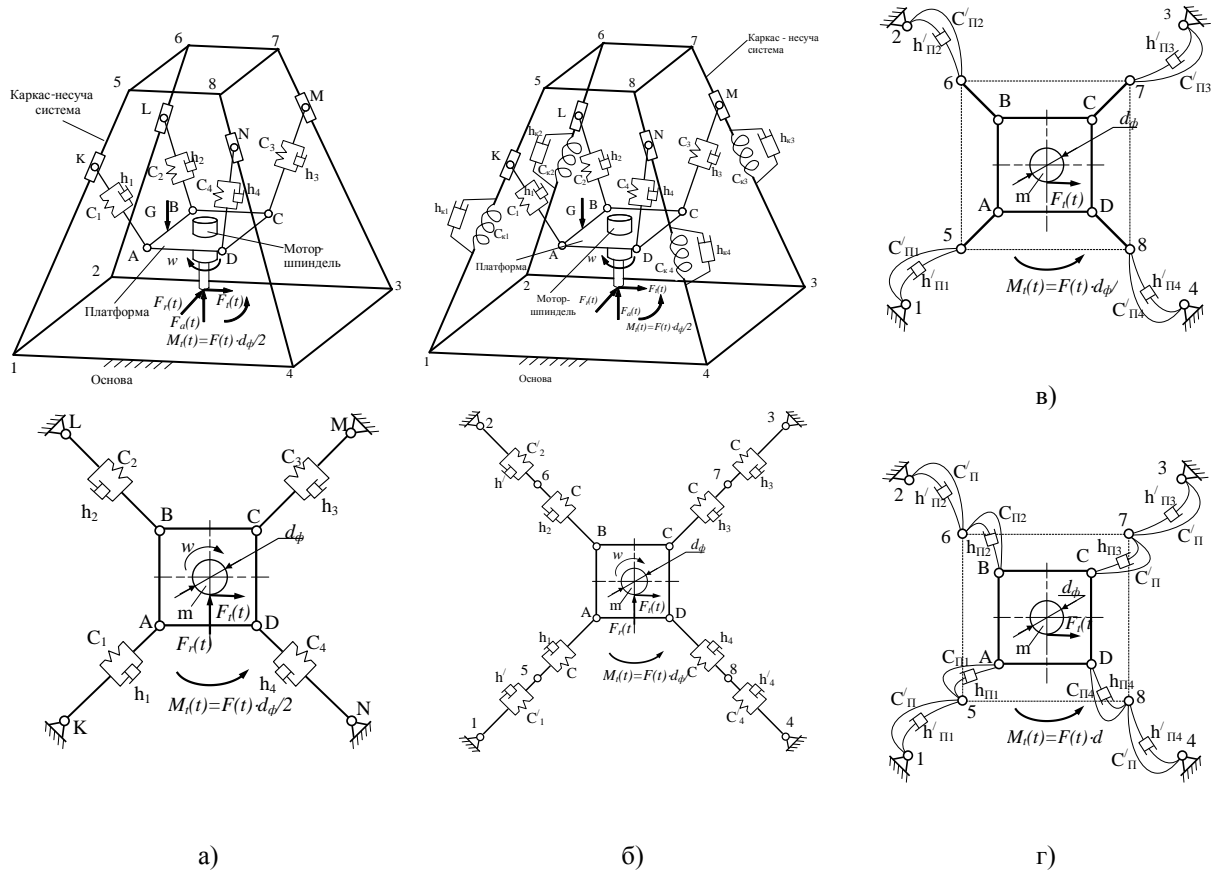
де  $t$  – глибина різання;  $y_p$  – показник степені для сили різання;  $B_p = C_{py} \cdot S^{x_p} \cdot K_p$  – постійна частина у емпіричній формулі для сили різання  $P_y$  [9].

В умовах обробки ППД випадкові коливання складуть:

$$\Delta P_{y0} = C_{рол} \delta y (h_{нлmax} - h_{нлmin}) \quad (7)$$

де  $C_{рол}$  – жорсткість корпусу оправки ролика;  $h_{нлmax}$ ,  $h_{нлmin}$  – відповідно максимальне і мінімальне пластичне вторгнення ролика в оброблювану деталь.

Для аналізу відклику каркасної системи МПС на розглянуті навантаження  $\mathbf{P}+\Delta\mathbf{P}$  необхідно виконати декомпозицію задачі на окремі етапи з врахуванням (або без врахування, в залежності від ступеню наближення) властивостей деяких груп елементів або окремих ланок (рис. 3).



**Рис. 3. Приклади декомпозиції загальної динамічної моделі на окремі розрахункові схеми каркасної компоновки верстату СФВПК-4 з МПС:**  
**а) врахування тільки лінійної податливості стрижневої системи рухомих ланок МПС;**  
**б) врахування лінійної податливості ребер каркасу і МПС;**  
**в) врахування тільки поворотної податливості ребер каркасу;**  
**г) врахування поворотної податливості МПС і ребер каркасу**

Аналітичний аналіз таких конструкцій є досить складним завданням, з іншого боку використання систем автоматизованого проектування загального призначення (на кшталт ANSYS, COMSOL Multiphysics та ін.) також потребує значних часових затрат на формування геометричної моделі, аналіз і завдання зв'язків тощо, особливо з врахуванням достатньої гнучкості, та, як наслідок, варіативності компоновок каркасного обладнання. Достатньо зручно проводити моделювання роботи обладнання з МПС в різних умовах з використанням спеціалізованих програмних пакетів, таких як лінійка програмних продуктів Tools Glide [6], Tools Response та Tools Apps [7] що розробляються на кафедрі основ конструювання (нині транспортних систем та технічного сервісу) Херсонського національного технічного університету.

Вказана лінійка призначена для генерування кінематики та аналізу статичного та динамічного відкликів глайд-обладнання без обмежень на форму зовнішніх навантажень, що можуть бути задані як довільні функції часу та внутрішніх параметрів системи з підтримкою зворотнього зв'язку. Для аналізу відклику конструкції на робочі зовнішні навантаження в усьому діапазоні технологічного процесу обробки система відокремлює статичні та динамічні навантаження – проходить наскрізний обмін даними між відповідними модулями: кінематика (пряма або зворотня задачі) – статичний відклик (формування тензорів коефіцієнтів жорсткості) – динамічний відклик [10-12]. Бібліотека скінченних елементів (рис. 4) пристосована для задач такого типу, з підтримкою можливості з'єднання компонентів шарнірами різних типів, бібліотеки останніх можуть бути поповнені додатковими об'єктами.

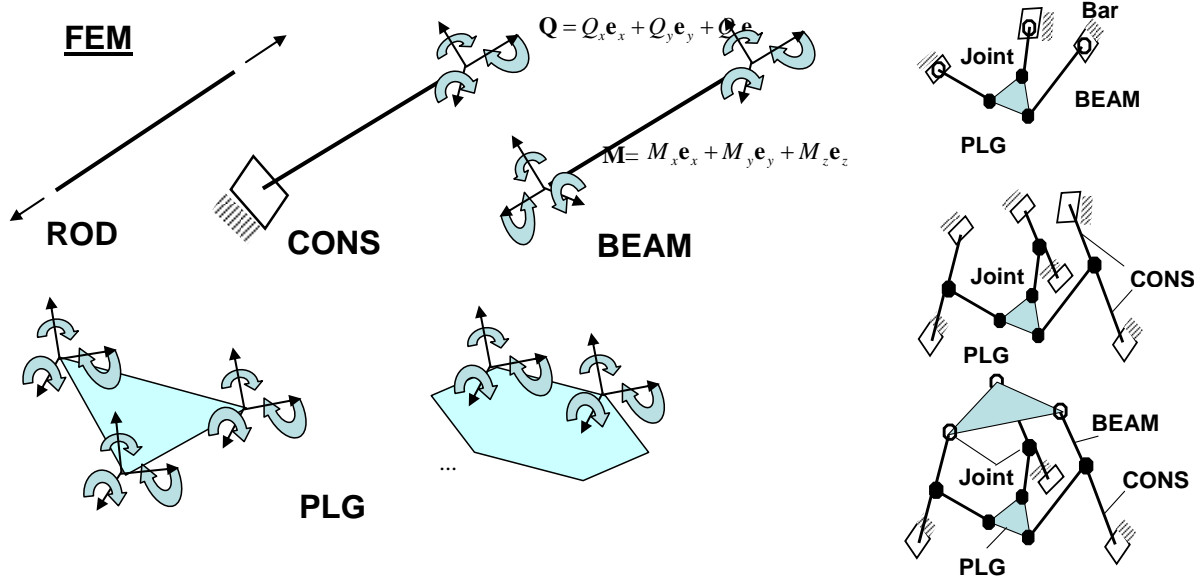


Рис. 4. Скінченні елементи модулю Tools Response (а) та варіанти композицій з них каркасної гайд-компоновки (б)

Вкажемо моделі деяких з основних елементів. Модель деформування просторових консольних елементів має вигляд:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix}^{(CONS)} = \begin{bmatrix} \frac{L^3}{3EI_y} & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{2EI_y} & 0 \\ 0 & \frac{L^3}{3EI_x} & 0 & -\frac{L^2}{2EI_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{EF} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L^2}{2EI_x} & 0 & \frac{L}{EI_x} & 0 & 0 \\ \frac{L^2}{2EI_y} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{EI_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{GI_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}^{(CONS)} \quad (8)$$

Модель деформування балочних елементів:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}^{\{BEAM\}}_1 &= \hat{\mathbf{C}}_Q^u \mathbf{Q}_1^{\{BEAM\}} + \hat{\mathbf{C}}_M^u \mathbf{M}_1^{\{BEAM\}} + (\mathbf{\Theta}_0 \times \mathbf{L})^{\{BEAM\}} + \mathbf{u}_0^{\{BEAM\}}, \\
 \mathbf{\Theta}^{\{BEAM\}}_1 &= \hat{\mathbf{C}}_Q^\varphi \mathbf{Q}_1^{\{BEAM\}} + \hat{\mathbf{C}}_M^\varphi \mathbf{M}_1^{\{BEAM\}} + \mathbf{\Theta}_0^{\{BEAM\}}.
 \end{aligned} \quad (9)$$

Модель жорсткої платформи:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_{PLG} &= \mathbf{\Theta} \times \mathbf{r}^{\{PLG\}} + \mathbf{u}_C, \\
 \theta_x^{\{PLG\}} &= -\frac{1}{\Delta} [(x_{J2} - x_{J3})u_{Jz1} - (x_{J1} - x_{J3})u_{Jz2} + (x_{J1} - x_{J2})u_{Jz3}]^{\{PLG\}},
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\theta_y^{\{PLG\}} = -\frac{1}{\Delta} [(y_{J2} - y_{J3})u_{Jz1} - (y_{J1} - y_{J3})u_{Jz2} + (y_{J1} - y_{J2})u_{Jz3}]^{\{PLG\}},$$

$$\theta_z^{(PLG)} = -\frac{u_{Jx2}^{(PLG)} - u_{Jx1}^{(PLG)}}{y_{J2}^{(PLG)} - y_{J1}^{(PLG)}},$$

$$u_{cx}^{(PLG)} = u_{Jx1}^{(PLG)} + \theta_z^{(PLG)} y_{J1}^{(PLG)},$$

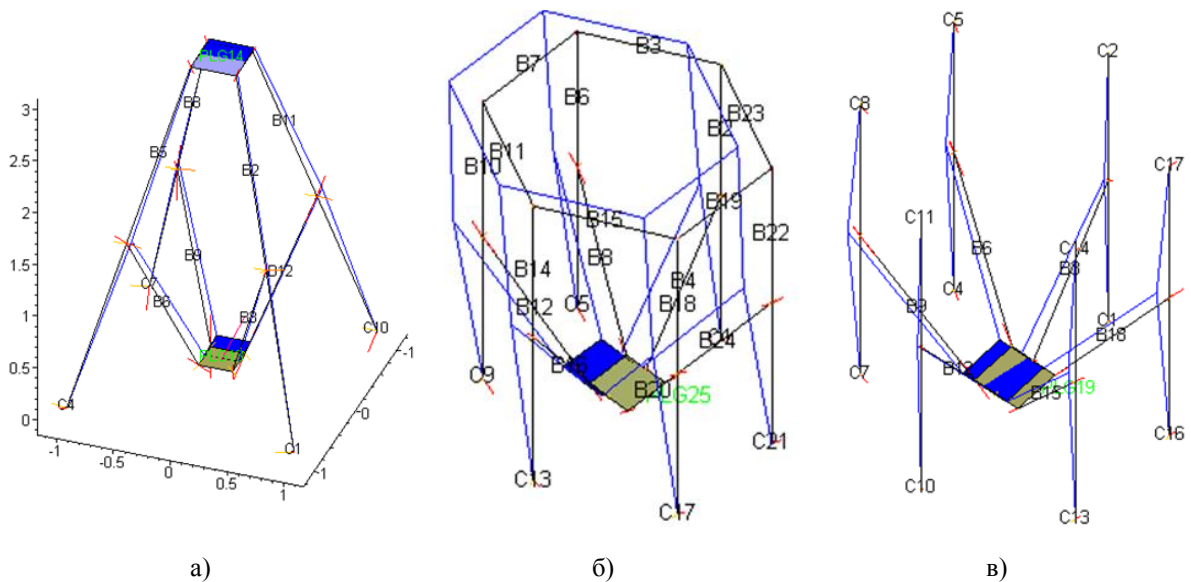
$$u_{cy}^{(PLG)} = u_{Jy1}^{(PLG)} - \theta_z^{(PLG)} x_{J1}^{(PLG)},$$

$$u_{cz}^{(PLG)} = \frac{1}{\Delta} [(x_{J2}y_{J3} - x_{J3}y_{J2})u_{Jz1} - (x_{J1}y_{J3} - x_{J3}y_{J1})u_{Jz2} + (x_{J2}y_{J2} - y_{J1}x_{J2})u_{Jz3}]^{(PLG)}$$

$$\Delta = [x_{J1}y_{J2} - x_{J1}y_{J3} - y_{J1}x_{J2} - x_{J2}y_{J3} + x_{J3}y_{J1} - x_{J3}y_{J2}]^{(PLG)}.$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор переміщення вузла,  $\phi$  – відносний кут повороту вузла,  $L$  – довжина консольного і балочного елемента,  $E$  – модуль пружності,  $G$  – модуль зсуву,  $I$  – статичні моменти інерції перетинів елементів,  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{M}$  – поперечні зусилля і моменти в перетинах консольних та балочних елементів,  $\hat{\mathbf{C}}_Q^u, \hat{\mathbf{C}}_M^u$  – блоки матриці жорсткості,  $\mathbf{r}_j = [x_j, y_j, z_j]$  – радіус-вектор вузла в системі координат рухомої платформи.

На рис. 5 вказані конфігурації відклику каркасної системи як кадри анімації в однаковому циклі технологічного процесу обробки. Помітний значний вплив не тільки питань компоновки каркасної конструкції на картину деформованого стану конструкцій, але й взаємного орієнтування системи «каркас – деталь – інструмент».



**Рис. 5. Порівняльні розрахунки відклику різних просторових структур в кадрі анімації обробки за моделями та алгоритмами лінійки програмних продуктів Tools Glide та Tools Response: аналог СФВПК-4 з МПС (а), бх- глайд з різними умовами зв'язків (б) та (в)**

Для визначення локацій та напрямків з заданою жорсткістю модуль Tools Response дозволяє отримувати в автоматичному режимі форми тензорних еліпсоїдів та еліпсоїдів податливостей для всього циклу обробки, при цьому проводиться визначення змінної динамічної величини пружного переміщення робочого органу стрижневої системи в місці навантаження з отриманням компонент тензору приведених коефіцієнтів жорсткості (лінійної та крутильної). Розрахунок тензорного еліпсоїду проводиться за рівнянням  $(\hat{\mathbf{T}}\mathbf{r})\mathbf{r} = 1$  де  $\mathbf{T}$  – тензор податливостей,  $\mathbf{r}$  – радіус-вектор.

Для визначення вібраційних відклику в системі Tools Apps [7] проводиться імпортування в останню компонент тензору приведених коефіцієнтів жорсткості та розраховуються коливання, які формують розміри та форму деталі, з врахуванням випадкових факторів за (2)-(7). Для  $n$ -ступеневого механізму математична модель перетворюється до вигляду

$$\mathbf{I}(\mathbf{q}) \frac{d^2 \mathbf{q}}{dt^2} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \frac{d\mathbf{q}}{dt}) = \mathbf{Q}, \tag{11}$$

де  $\mathbf{q}$ ,  $\frac{d\mathbf{q}}{dt}$ ,  $\frac{d^2\mathbf{q}}{dt^2}$  – вектори відповідно узагальнених координат, швидкостей та прискорень;  $\mathbf{I}(\mathbf{q})$  – матриця інерції механізму;  $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \frac{d\mathbf{q}}{dt})$  – вектор відцентрових, коріолісових та дисипативних сил;  $\mathbf{Q}$  – вектор узагальнених сил, які прикладені до ланок і шарнірів механізму.

#### Висновки

Розроблені математичні моделі і інтерактивні програмні модулі для прикладної оцінки жорсткості обладнання просторових компоновок із механізмами паралельної структури та точності відтворення траєкторії робочого органу в умовах силового навантаження дозволяють оцінити можливість використання такого обладнання для обробки складно-профільних деталей поверхневим пластичним деформуванням. Вказана алгоритмічна послідовність оцінки дозволяє врахувати випадкові коливання параметрів обробки та провести кількісні порівняльні розрахунки відклику різних просторових структур за моделями та алгоритмами лінійки програмних продуктів ToolsGlide, ToolsResponse та ToolsApps без обмежень на форму зовнішніх навантажень, що можуть бути задані як довільні функції часу та внутрішніх параметрів системи з підтримкою зворотнього зв'язку. Для визначення локацій та напрямків з заданою жорсткістю Tools Response дозволяє отримувати в автоматичному режимі форми тензорних еліпсоїдів та еліпсоїдів податливостей для всього циклу обробки.

#### Список використаної літератури

1. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов. Учебное пособие-справочник / Под редакцией д.т.н., проф. В. Д. Евдокимова. – Одесса Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2005. – 352 с.
2. Ткачук А.А. Технологічні основи зміцнювально-вигладжувального оброблення поверхонь обертання. – Луцьк: СПД Галяк Жанна Володимирівна друкарня «Волиньполіграф», 2014. – 196 с.
3. Кузнецов Ю.М. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури: Монографія / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич; під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
4. Забезпечення якості обробки довгомірних деталей поверхневим пластичним деформуванням з використанням полімервмісних МОТЗ: Автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. О. Дмитрієв; В.о. Нац. техн. ун-т України "Київський політехнічний інститут". – К.: Б.В., 2003. – 22 с.
5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.: Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
6. Комп'ютерна програма "ToolsGLIDE". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №57913. / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв, П.В. Кеба, Ю.М. Кузнецов. – Заявл. 03.11.2016; Опубл. 29.12.2016.
7. Комп'ютерна програма "ToolsApp". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №57913. / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв, М.І. Подольський, Ю.М. Кузнецов. – Заявл. 03.11.2014; Опубл. 29.12.2014.
8. Кузнецов Ю.Н. Анализ динамической системы шпиндель-патрон-деталь токарного автомата. – Вестник машиностроения, 1990, №8, с. 42-47.
9. Рыжов Э.И., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
10. Русанов С.А., Дмитрієв Д.О., Комплексний аналіз механізмів паралельної структури засобами цільових систем автоматизованого моделювання // Тези доповідей VII міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ – Херсон, 2016, с. 152-155.
11. Дмитрієв Д.О., Русанов С.А., Кеба П.В., Півень С.М. Зовнішні модулі для прогнозування та управління складними рухами ланок механізмів паралельної структури // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016): матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. – Чернігів: ЧНТУ, 2016.– С. 44-47.
12. Русанов С.А., Рачинський В.В., Дмитрієв Д.О. Просторовий аналіз шарнірно-стрижневих механізмів для механічної обробки поверхневим зміцненням складнопрофільних деталей. // Матеріали II-ї всеукраїнської конференції «Приладобудування і метрологія. Сучасні проблеми, тенденції розвитку». Луцьк: ЛНТУ, 2016, С. 81-83.