

УДК 62-229.324

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-8

Дячун А. Є., Федоревич В. М., Грасовник В. Ю., Гинда Т. Ю., Дериш О. Б.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВКИ З НАВИВНИМИ СТРІЧКОВИМИ ПРУЖНИМИ ГВИНТОВИМИ ЗАТИСКНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

У статті представлено конструкцію і трьохмірну модель оправки з навивними стрічковими пружними гвинтовими затискними елементами. Перевагою таких оправок є можливість затиску тонкостінних циліндричних заготовок за рахунок розподілення зусилля затиску по всій поверхні контакту між заготовкою та пружним гвинтовим затискним елементом. Представлено параметричні рівняння поверхні гвинтового затискного елемента з конічними частинами. Розроблено розрахункову схему геометричних параметрів затиску заготовки гвинтовим затискним елементом з конічними частинами. Виведено рівняння для визначення осьової сили, що необхідно прикладати на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при його деформуванні.

Побудовано графіки залежності осьової сили, що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску заготовки від геометричних параметрів гвинтового затискного елемента. Проведено дослідження напружено-деформованого стану оправки з пружним гвинтовим затискним елементом та закріпленій на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили методом кінцевих елементів.

Ключові слова: оправка, навивний затискний елемент, стрічковий гвинтовий затискний елемент, деформація, осьова сила, напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. Для затиску та базування під час оброблення циліндричних заготовок, особливо тонкостінних, широко використовуються оправки та патрони з пружними затискними елементами, серед яких можна виділити цангові оправки, з гофрованими елементами, оболонковими елементами, гідропластові, гідромеханічні, з тарілчастими пружинами та інші. Серед вказаних конструкцій особливу увагу приділено оправкам з гвинтовими затискними елементами, основний принцип роботи яких полягає у зміні розмірів гвинтових затискних елементів під час прикладання на торцях осьового навантаження або крутного моменту. Зміна розміру у радіальному напрямку дорівнює зазору між заготовкою та гвинтовим затискним елементом. Перевагою таких оправок є можливість затиску тонкостінних циліндричних заготовок за рахунок розподілення зусилля затиску по всій поверхні контакту між заготовкою та пружним гвинтовим затискним елементом. Для збільшення сили затиску заготовок у таких оправках використовують додаткові елементи, що ускладнює їх конструкцію. Для збереження простоти конструкції оправки та підвищення сил затиску заготовки запропоновано використовувати конічні гвинтові затискні елементи. Розроблення та дослідження роботи гвинтових затискних елементів у патронах, оправках, захоплювачах робіт виконували такі науковці: Гевко Б. М. [1-3], Васильків В. В. [4, 5], Ляшук О. Л. [2, 3], Скиба О. П. [5-7], Генік І. С. [8], Гагалюк А. В. [9], Луців І. В. [12, 13] та інші.

У роботах [4, 5] розроблено багатоваріантну структуру конструктивних та функціональних особливостей реалізації процесів затиску заготовок, а також синтез у вигляді системи ієрархічних трьох рівнів затискних пристроїв, в основі яких використовуються пружні затискні елементи, що дало можливість генерування множини можливих альтернатив для кожного рівня. Спроековано і реалізовано у виробництві різноманітні патрони та оправки [7-9, 12-16]. Розроблено математичні моделі для розрахунку сили затиску заготовки для забезпечення її механічної обробки [2, 5, 7, 14, 16]. Розглянуто циліндричні, конічні, гофровані гвинтові затискні елементи [1, 7-9]. Також визначено похибки базування та закріплення заготовок гвинтовими затискними елементами [7, 8]. Визначено загальну умову фрикційної взаємодії гвинтового елемента затиску з опорними елементами затискного пристрою по всій довжині гвинтового затискного елемента [7, 8]. Проведено ряд експериментальних досліджень для визначення силових параметрів процесу затиску заготовок гвинтовими затискними елементами, жорсткості затискних пристроїв а також проведено механічне оброблення закріплених деталей [7-9]. У розглянутих роботах не враховано можливість використання конічних гвинтових затискних елементів для підвищення сил затиску заготовки.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою роботи є розроблення

конструкції оправки з навивними стрічковими пружними конічними гвинтовими затискними елементами та встановлення взаємозв'язку її конструктивних та силових параметрів в процесі затиску заготовки.

Для досягнення мети роботи розроблено оправку з пружними конічними гвинтовими затискними елементами, що представлено на рис. 1.

Оправка з навивними стрічковими пружними конічними гвинтовими затискними елементами (рис. 1) складається із корпусу 1 з конічним хвостовиком, за допомогою якого оправка встановлюється у конічному отворі шпинделя токарного або круглошліфувального верстата. На корпусі 1 встановлено упорне кільце 2, що застосовується як елемент базування циліндричної заготовки 3. Затиск і базування заготовки по внутрішній циліндричній поверхні здійснюється тарілчастим гвинтовим затискним елементом 4, що вільно встановлений на циліндричній частині корпусу 1. В отворі корпусу 1 встановлено затискну втулку 5 з можливістю осевого переміщення за рахунок обертання гвинта 6.

Робота оправки з пружними гвинтовими затискними елементами виконується таким чином. Заготовку 3 базують по зовнішній циліндричній поверхні тарілчастого гвинтового затискного елемента 4 з у пором в кільце 2. Після цього повертають гвинт 6, який переміщує затискну втулку 5 вліво.

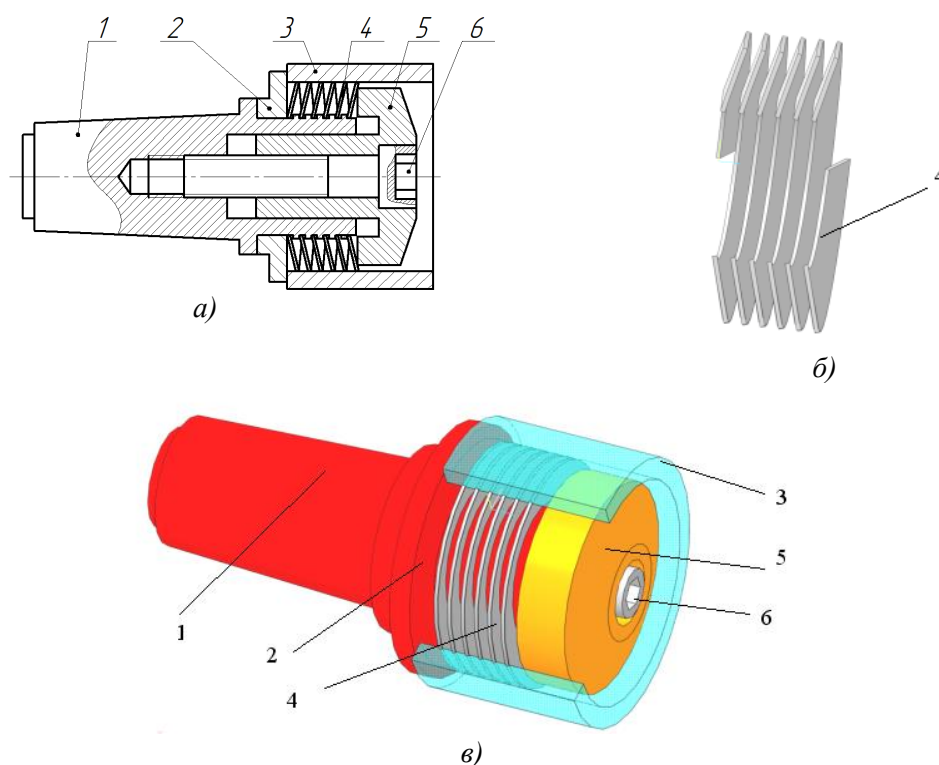


Рисунок 1 – Конструкція оправки з пружними гвинтовими затискними елементами
а) поперечний переріз; б) переріз тарілчастого гвинтового затискного елемента; в) трьохмірне зображення

Остання стискає тарілчастий гвинтовий затискний елемент 4, внаслідок чого спочатку зменшується його крок витків і зростає зовнішній діаметр до контакту із заготовкою 3, а потім за рахунок деформації конічної форми гвинтового затискного елемента, зменшується його внутрішній діаметр до контакту із циліндричною частиною корпусу 1. Внаслідок цього відбувається одночасне базування та затиск заготовки 3 по центральному отвору.

Після механічного оброблення заготовки викручують гвинт 6, тарілчастий гвинтовий затискний елемент 4 розтягується до вихідної форми, при цьому зменшується його внутрішній діаметр, виходячи із контакту із заготовкою 3. Знімають заготовку. Оброблення наступної заготовки здійснюється аналогічно.

У роботі тарілчастого гвинтового затискного елемента можна виділити два основних етапи:

1. Деформація в осьовому та радіальному напрямку за рахунок прикладання осевого навантаження і зменшення кроку витків.

2. Деформація в осьовому напрямку та радіальному напрямку за рахунок прикладання осьового навантаження і зміни кута нахилу конічної частини гвинтового елемента.

Поверхню гвинтового затискного елемента (ГЗЕ) з конічними частинами можна описати параметричними рівняннями:

$$x = R \cos \theta; \quad y = R \sin \theta; \quad z = \frac{T}{2\pi} \theta + R \sin \alpha, \quad (1)$$

де R – зовнішній радіус ГЗЕ; T – крок витків ГЗЕ на середній лінії; θ – кутовий параметр; α – кут нахилу конічної частини гвинтового затискного елемента.

На основі рівняння (1) побудовано поверхню гвинтового затискного елемента з конічними частинами, що зображена на рисунку 2.

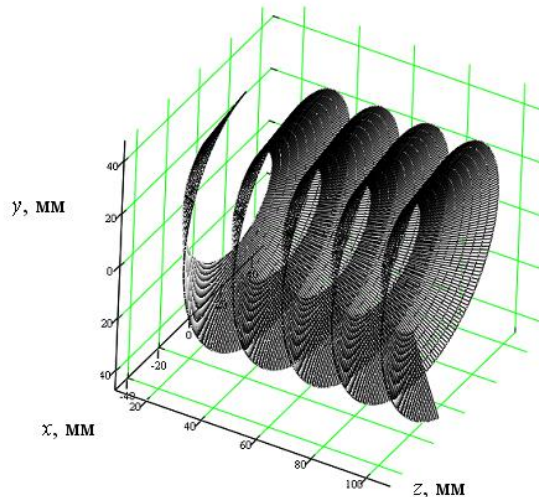


Рисунок 2 – Поверхня гвинтового затискного елемента з конічними частинами

Під час затиску заготовки на першому етапі розміри радіуса R ГЗЕ зростають, при цьому крок T витків зменшується:

$$R = R_0 + \Delta R; \quad (2)$$

$$T = T_0 - \Delta T, \quad (3)$$

де ΔR – величина приросту радіуса ГЗЕ під час затиску заготовки;

ΔT – величина зменшення кроку T витків при осьовому навантаженні;

R_0 – початковий радіус витків, T_0 – початковий крок витків.

Геометричні параметри затиску заготовки гвинтовим затискним елементом з конічними частинами показано на розрахунковій схемі (рис. 3).

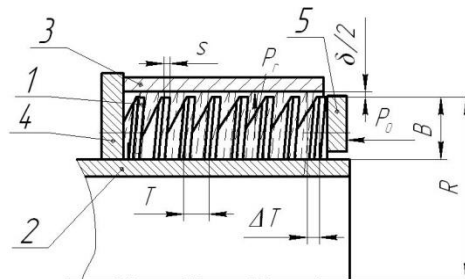


Рисунок 3 – Розрахункова схема геометричних параметрів затиску заготовки гвинтовим затискним елементом з конічними частинами: 1 – гвинтовий затискний елемент, 2 – корпус оправки, 3 – заготовка, 4 – упорне кільце, 5 – затискна втулка

Величина приросту радіуса ГЗЕ під час затиску заготовки [10]:

$$\Delta R = \frac{\Delta K \left(R^2 + \frac{T_0^2}{4\pi^2} \right)^2 + R \Delta T \frac{T_0}{2\pi^2}}{-R^2 + \frac{T_0^2}{4\pi^2}}; \quad (4)$$

$$\Delta R = \frac{\delta}{2}, \quad (5)$$

де δ – початковий зазор між заготовкою та гвинтовим затискним елементом з конічними частинами;

ΔK – зміна кривизни дуги гвинтового затискного елемента з конічними частинами.

Зміну кривизни дуги гвинтового затискного елемента з конічними частинами визначаємо за формулою [10]:

$$\Delta K = \frac{M_3}{EJ_x}, \quad (6)$$

де M_3 – момент згину витка ГЗЕ;

E – модуль Юнга матеріалу ГЗЕ;

J_x – осьовий момент інерції поперечного перерізу витка ГЗЕ.

Осьовий момент інерції поперечного перерізу витка ГЗЕ [11]:

$$J_x = \frac{sB}{12} (B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha), \quad (7)$$

де s – товщина матеріалу витка ГЗЕ; B – ширина витка ГЗЕ; α – кут нахилу конічної частини гвинтового елемента.

Момент згину витка гвинтового затискного елемента з конічними частинами:

$$M_3 = P_0 R \sin \beta; \quad (8)$$

$$\sin \beta = \frac{T_0}{\sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}; \quad (9)$$

$$M_3 = \frac{P_0 R T_0}{\sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}, \quad (10)$$

де P_0 – осьова сила, прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами за рахунок переміщення втулки 5 і обертання гвинта 6;

β – кут підйому гвинтової лінії затискного елемента.

Момент кручення витка гвинтового затискного елемента з конічними частинами:

$$M_k = P_0 R \cos \beta; \quad (11)$$

$$\cos \beta = \frac{2\pi R}{\sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}; \quad (12)$$

$$M_k = \frac{2\pi P_0 R^2}{\sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}. \quad (13)$$

Величину зменшення кроку T витків при осьовому навантаженні виводимо на основі досліджень [10]:

$$\Delta T = \frac{\Delta \Omega \left(256\pi^8 R^6 - 64\pi^6 R^4 T_0^2 + 64\pi^5 R^4 T_0^2 + 4T_0^4 R^2 \pi^2 - T_0^6 \right) + \dots}{4\pi^2 \left(32\pi^5 R^4 + 24\pi^3 R^2 T_0^2 - 4R^2 \pi^2 T_0^2 + T_0^4 \right)} \dots$$

$$\dots \frac{+ \Delta K \left(-256\pi^7 T_0 R^5 - 128\pi^5 T_0^3 R^3 - 16\pi^3 T_0^5 R \right)}{\dots}.$$
(14)

Зміну кручення дуги гвинтового затискного елемента з конічними частинами визначаємо за формулою [10]:

$$\Delta \Omega = \frac{M_k}{GJ_p},$$
(15)

де G – модуль пружності другого роду матеріалу ГЗЕ;

J_p – полярний момент інерції поперечного перерізу витка ГЗЕ.

Полярний момент інерції поперечного перерізу витка ГЗЕ [11]:

$$J_p = sB^3 \xi.$$
(16)

Підставляючи формули (7), (10) у формулу (6), одержуємо:

$$\Delta K = \frac{12P_0 R T_0}{sBE \left(B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha \right) \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}.$$
(17)

Підставляючи формули (13), (16) у формулу (15), одержуємо:

$$\Delta \Omega = \frac{2\pi P_0 R^2}{GsB\xi \left(B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha \right) \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}}.$$
(18)

Підставляємо дані у рівняння (14)

$$\Delta T = \frac{\frac{2\pi P_0 R^2}{GsB^3 \xi \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}} \left(256\pi^8 R^6 - 64\pi^6 R^4 T_0^2 + 64\pi^5 R^4 T_0^2 + 4T_0^4 R^2 \pi^2 - T_0^6 \right) + \dots}{4\pi^2 \left(32\pi^5 R^4 + 24\pi^3 R^2 T_0^2 - 4R^2 \pi^2 T_0^2 + T_0^4 \right)} \dots$$

$$+ \frac{12P_0 R T_0}{sBE \left(B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha \right) \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2}} \left(-256\pi^7 T_0 R^5 - 128\pi^5 T_0^3 R^3 - 16\pi^3 T_0^5 R \right) \dots$$
(19)

Із рівняння (19) знаходимо осьову силу, що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами

$$P_0 = \frac{4\pi^2 \Delta T s B \left(B^2 \cos \alpha + s^2 \sin \alpha \right) \sqrt{4\pi^2 R^2 + T_0^2} \left(32\pi^5 R^4 + 24\pi^3 R^2 T_0^2 - 4R^2 \pi^2 T_0^2 + T_0^4 \right)}{2\pi R^2 \left(256\pi^8 R^6 - 64\pi^6 R^4 T_0^2 + 64\pi^5 R^4 T_0^2 + 4T_0^4 R^2 \pi^2 - T_0^6 \right) + \dots}$$

$$\dots \frac{+ \frac{12RT_0}{E} \left(-256\pi^7 T_0 R^5 - 128\pi^5 T_0^3 R^3 - 16\pi^3 T_0^5 R \right)}{\dots}.$$
(20)

Використовуючи рівняння (20), побудовано графіки залежності осьової сили P_0 , що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску

заготовки від геометричних параметрів гвинтового затискного елемента (рисунки 4, 5).

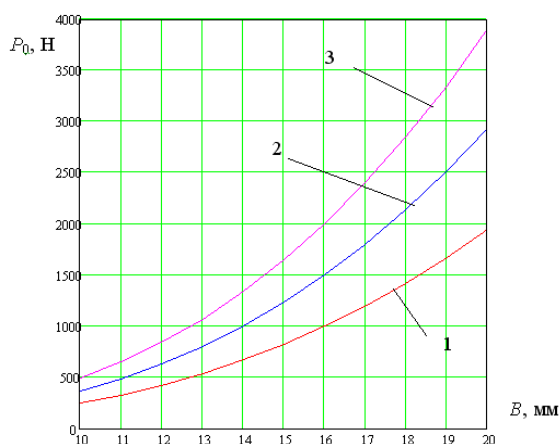


Рисунок 4 – Графіки залежності осьової сили P_0 , що прикладена на торці ГЗЕ з конічними частинами при затиску заготовки від ширини витка ГЗЕ $R=50$ мм, $s=2$ мм: 1) $\Delta T=4$ мм; 2) $\Delta T=6$ мм; 3) $\Delta T=8$ мм

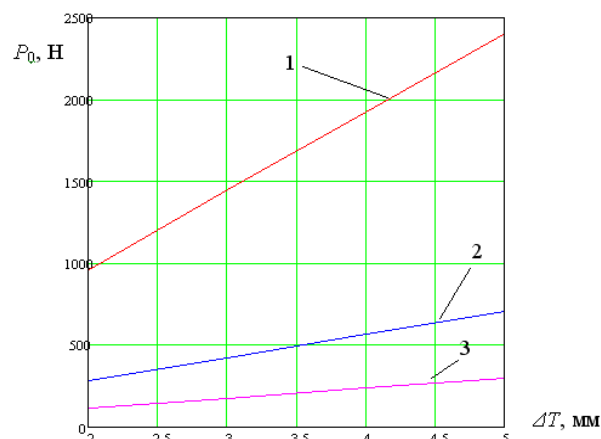


Рисунок 5 – Графіки залежності осьової сили P_0 , що прикладена на торці ГЗЕ з конічними частинами при затиску заготовки від величина зменшення кроку витків ΔT при осьовому навантаженні $B=10$ мм, $s=2$ мм: 1) $R=20$ мм; 2) $R=30$ мм; 3) $R=40$ мм

З рисунків 4 і 5 та на основі аналізу рівняння (20) визначено, що із збільшенням ширини та товщини витка гвинтового затискного елемента, величини зменшення кроку витків осьова сила P_0 , що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску заготовки зростає, а при збільшенні зовнішнього радіуса ГЗЕ – зменшується.

Максимальна величина осьової сили P_0 , що прикладена на торці ГЗЕ з конічними частинами при затиску заготовки складає 3814 Н, а мінімальна величина – 122 Н. Збільшення ширини витка гвинтового затискного елемента від 10 мм до 20 мм призводить до зростання осьової сили P_0 в 7,6 рази.

Збільшення величини зміни кроку витків від 2 мм до 5 мм призводить до зростання осьової сили P_0 в 2,5 рази. При цьому збільшення величини зовнішнього радіуса гвинтового затискного елемента від 20 мм до 40 мм призводить до зменшення осьової сили P_0 в 7,6 рази.

Отже, для зменшення осьової сили P_0 , що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску заготовки потрібно застосовувати ГЗЕ з мінімальною товщиною і шириною стрічки допустимими жорсткістю системи та з мінімальним зазором між заготовкою та ГЗЕ, що відповідно зменшує зміну кроку витків та хід затискної втулки.

Також на основі розробленої моделі рис. 1 за допомогою прикладного програмного забезпечення проведено дослідження напружено-деформованого стану оправки з пружним ГЗЕ та закріплених на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили методом кінцевих елементів. Результати моделювання представлено на рис. 6, 7, 8.

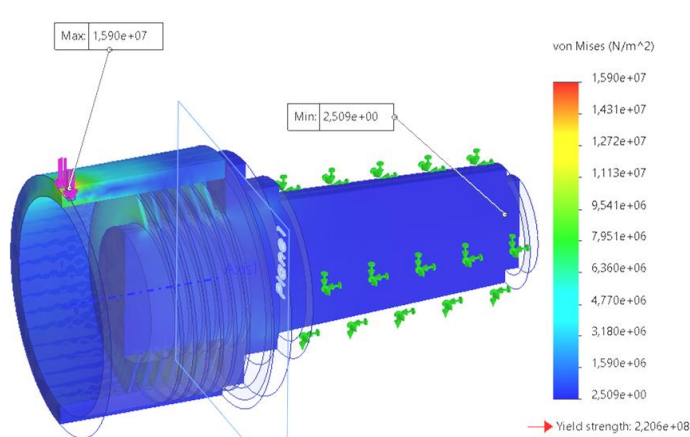


Рисунок 6 – Розподіл напружень в оправці з пружним ГЗЕ та закріплених на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили

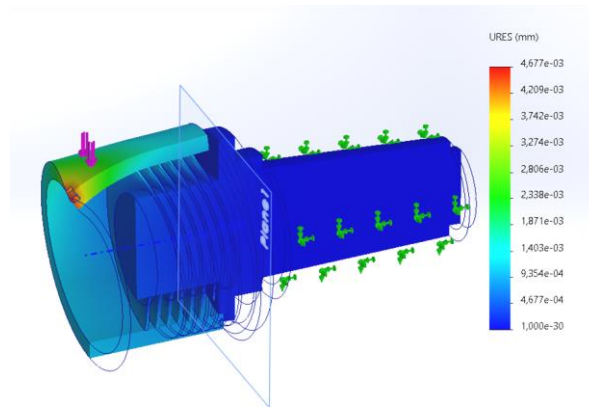


Рисунок 7– Розподіл деформацій в оправці з пружним ГЗЕ та закріпленій на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили

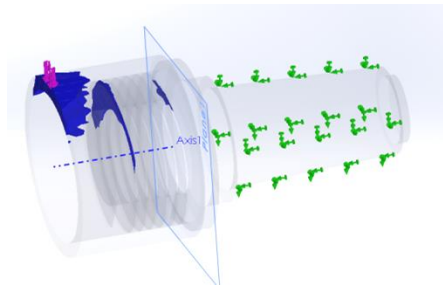


Рисунок 8 – Визначення місць оправки з пружним ГЗЕ та закріпленої на ній заготовки, що мають найменший запас міцності

В результаті моделювання (рис. 6 та 7) встановлено, що при зовнішній радіальній силі 200 Н максимальні напруження дорівнюють 15,9 МПа, а максимальні деформації виникають на консольній частині заготовки і дорівнюють 0,005 мм. Максимальні напруження (5 МПа) та деформації на оправці (0,0012 мм) спостерігались на першому витку ГЗЕ. Відповідно найменший запас міцності одержано на консольній частині заготовки та на першому витку ГЗЕ. Одержані значення напружень не перевищують границю текучості матеріалів заготовки та ГЗЕ, а деформації знаходяться в межах допуску на оброблення поверхонь заготовки.

Висновки. Представлено конструкцію і трьохмірну модель оправки з навитими стрічковими пружними гвинтовими затискними елементами. Перевагою таких оправок є можливість затиску тонкостінних циліндричних заготовок, за рахунок розподілення зусилля затиску по всій поверхні контакту між заготовкою та пружним гвинтовим затискним елементом. Представлено параметричні рівняння поверхні гвинтового затискного елемента з конічними частинами. Розроблено розрахункову схему геометричних параметрів затиску заготовки гвинтовим затискним елементом з конічними частинами. Виведено рівняння для визначення осьової сили, що необхідно прикладати на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при його деформуванні.

Побудовано графіки залежності осьової сили, що прикладена на торці гвинтового затискного елемента з конічними частинами при затиску заготовки від геометричних параметрів гвинтового затискного елемента. Проведено дослідження напружено-деформованого стану оправки з пружним гвинтовим затискним елементом та закріпленій на ній заготовці при дії зовнішньої радіальної сили методом кінцевих елементів. Подальші дослідження спрямовані на виготовлення оправки з ГЗЕ та проведення експериментів.

Інформаційні джерела

1. Гевко Б., Кочубинська О., Дячун А. Розрахунок затискних оправок верстатів з гвинтовими гофрованими елементами. Вісник Тернопільського державного технічного університету. Тернопіль, 2008. Т.13, №2. С. 54-60.
2. Гевко Б. М., Дячун А. Є., Скиба О. П., Ляшук О. Л., Пік А. І. Теоретичне обґрунтування взаємодії гвинтових затискних елементів із заготовкою. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. Краматорськ, 2010. Вип. 27. С. 102-106.
3. Гевко Б. М., Дячун А. Є., Ляшук О. Л., Клендій В. М. Розрахунок патрона для затискання тонкостінних циліндричних заготовок. Вісник Національного університету

“Львівська політехніка”. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. 2011. № 713. С. 63–67.

4. Васильків В. В., Геник І. С., Скиба О. П. До питання синтезу конструкції механізмів з робочими затискними пружними гвинтовими елементами. Житомирський державний технологічний університет. Зб. наук. праць. Житомир, 2006. Вип. 3. С. 171-180.

5. Гевко І. Б., Васильків В. В., Геник І. С., Скиба О. П. До питання розрахунку конструктивних параметрів затискних пристроїв з гвинтовими елементами. Наукові нотатки. Луцьк, 2005. Вип. 17. С. 49-57.

6. Скиба О. П. Синтез гвинтових затискних пристроїв для закріплення тонкостінних заготовок на металорізальних верстатах: дис. ... кандидата техн. наук : 05.03.01. Тернопіль, 2010. 180 с.

7. Гевко І. Б., Скиба О. П. Дослідження сили затиску заготовок затискними гвинтовими патронами. Вісник ТДТУ. Тернопіль 2009. Том 14. №2. С. 57-62.

8. Геник І. С. Теоретичне обґрунтування параметрів гвинтових затискних пристроїв металорізальних верстатів : дис... кандидата техн. наук : 05.03.01. Тернопіль, 2006. 178 с.

9. Гагалюк А. В. Підвищення якості оброблення циліндричних поверхонь деталей машин з використанням спорядження з передавально-підсилюючими елементами : дис... кандидата техн. наук : 05.02.08 Тернопіль, 2011. 177 с.

10. Nevko, I., Liashuk O., Diachun A., Hud V. Investigation of the sectional working body deformation of a flexible screw conveyor. ТЕКА. 2019. Vol. 19. No. 3. P. 11–20.

11. Опір матеріалів: навчальний посібник до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи / Т. А. Довбуш та ін. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.

12. Луців І. В., Волошин В. Н. Затискні кулачки з адаптивними властивостями для затиску тонкостінних деталей. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, 14-15 травня 2020 року. Т. : ТНТУ, 2020. С. 90–91.

13. Луців І., Волошин В., Лось І. Розрахунок напружено-деформованого стану затискного кулачка з адаптивними властивостями. МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 43–44.

14. Sohrabifard, M., Nategh, M. J., Ghazavi, M. R. Evaluation, calibration, and modal analysis for determination of contact stiffness between workpiece and components of milling fixture. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2023. 237(12). P. 1819-1835.

15. Sobora, D., Povolny, M. Jig for clamping the chuck during milling. Proceedings of the 34th DAAAM International Symposium. 2023. 34. P. 531-536.

16. Ivanov V., Botko F., Dehtiarov I., Kočiško M., Evtuhov A., Pavlenko I., Trojanowska, J. Development of flexible fixtures with incomplete locating: connecting rods machining case study. Machines. 2022. 10. 493.

Diachun A., Fedorevych V., Grasovnyk V., Gynda T., Derysh O.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

THE STUDY OF MANDREL PARAMETERS WITH WOUND ELASTIC TAPE SCREW CLAMPING ELEMENTS

The article presents the design and three-dimensional model of a mandrel with wound elastic tape screw clamping elements. The advantage of such mandrels is the ability to clamp thin-walled cylindrical workpieces by distributing the clamping force over the entire contact surface between the workpiece and the elastic screw clamping element. The parametric equations of the surface of a screw clamping element with conical parts are presented. The calculation scheme of the geometrical parameters of clamping the workpiece with a screw clamping element with conical parts was developed. The equation for determining the axial force that must be applied to the end of a screw clamping element with conical parts during its deformation is derived. Graphs of the dependence of the axial force applied to the end of the screw clamping element with conical parts when clamping the workpiece on the geometric parameters of the screw clamping element were constructed. The stress-strain state of a mandrel with an elastic screw clamping element and a workpiece fixed on it under the action of an external radial force was studied using the finite element method.

Keywords: mandrel, wound clamping element, tape screw clamping element, deformation, axial force, stress-strain state.