

оскільки в стані гартування з низьким відпуском переважають злами іншого типу – від дії нормальних напружень.

Проведені експерименти над торсійними валами підтвердили ефективність ВТМО з деформуванням крученням і подальшими операціями холодного поверхневого та об'ємного нагартування.

1. Кукляк Н.Л., Романив О.Н., Черепанова Г.И, Астафьева Е.В., Цыпкина Е.Д.. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства стали 45ХНМФА при кручении // Физико-химическая механика материалов 1968. № 2. С.128-132. 2. Кукляк М.Л. Про вибір параметрів технологічного процесу ВТМО сталі 45ХН2МФА-Ш // Вісн. ДУ "Львівська політехніка». Львів. 1996. № 303. С.55-62.

УДК 539.3

Малащенко В.О., Божкова Л.В. *, Рябов В.Г. **

***ДУ “Львівська політехніка”, кафедра “Деталі машин”;**

****Московський Державний технічний університет “МАМІ”**

КОНТАКТНА ЗАДАЧА ДЛЯ ТРИШАРОВОГО ПРУЖНОГО ПОКРИТТЯ ТВЕРДОГО ТІЛА

© Малащенко В.О., Божкова Л.В. *, Рябов В.Г. **, 2000

Зроблено спробу розв’язати контактну задачу для багатошарового пружного покриття внутрішнього отвору циліндра та твердого тіла. Одержані рівняння, що описують напружено-деформований стан переміщень елементів з’єднання та інших основних його характеристик. Проведено кількісний аналіз впливу силових чинників на величину зони доторкання.

The attempt of the decision of a contact problem for many layers of elastic cover internal hole of a cylinder and solid body is made. The equations describing strength-deferrable condition of moving of elements of connection and othermain its characteristics are received. The quantitative analysis of influence of power parameters on size of a zone of contact is conducted.

З метою покращання амортизаційних властивостей контактуючих поверхонь підшипників ковзання різних машин і механізмів останнім часом використовують багатошарові пружні покриття робочих частин цих пристроїв. Це вимагає розв’язання контактної задачі взаємодії пружного покриття циліндричного отвору з жорстким валом, який розміщений з деяким зазором всередині нього (рис.1).

Під час дії сили Q , внаслідок деформації пружних шарів, існує доторкання цапфи жорсткого вала, що має радіус r_0 , з внутрішнім пружним шаром на дузі, яка вимірюється кутом 2θ (рис. 1).

Спираючись на умову плоскої деформації та нехтуючи силами тертя в зоні контакту, визначимо значення цієї зони (2θ), а також закон розподілення контактного тиску $p(\theta)$ у

робочій зоні, опишемо напружено-деформований стан пружних шарів і напруження на зв'язуючих поверхнях цих шарів.

Розв'язування сформульованих задач виконуємо з використанням полярних координат r, θ і базуємо його на результатах, отриманих в роботах [1, 3] та основних положеннях теорії пружності з застосуванням функції Ері [6].

Для визначеності кожному кільцевому шарові покриття присвоюємо відповідну цифру 1, 2, 3, починаючи відлік від шару, що безпосередньо покриває внутрішню поверхню отвору циліндра 4.

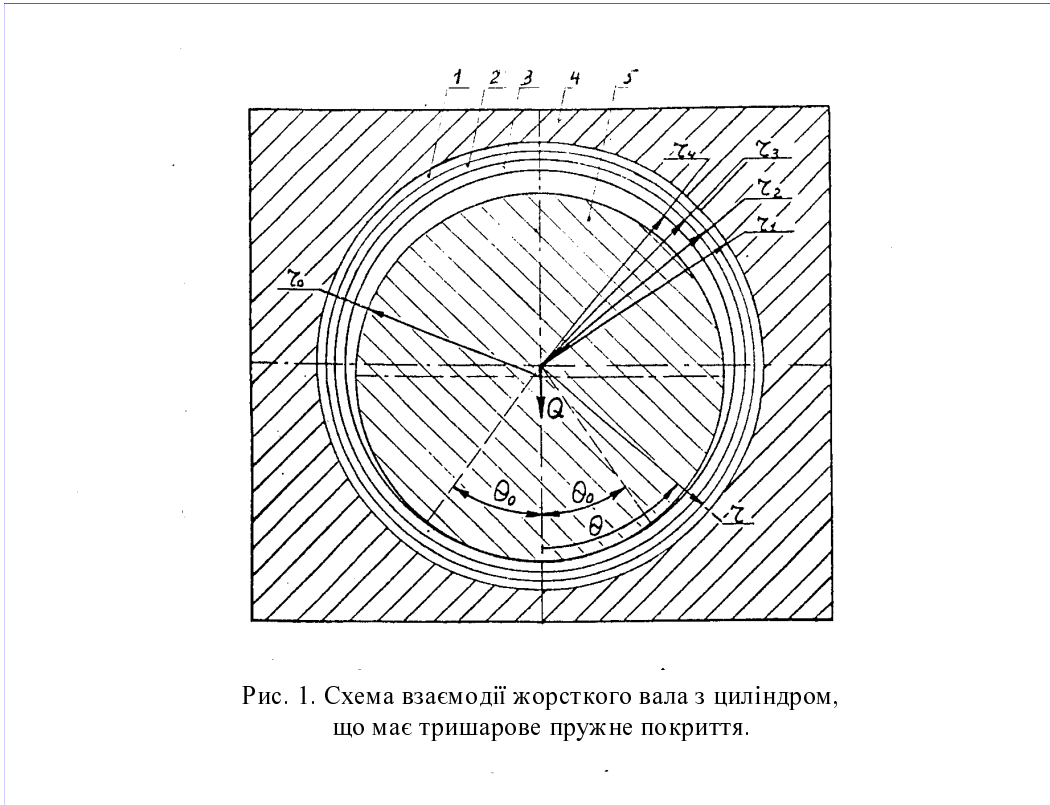


Рис. 1. Схема взаємодії жорсткого вала з циліндром, що має тришарове пружне покриття.

Використовуючи результати робіт [1-3], запишемо в безрозмірній формі компоненти тензора напружень (радіальні $\bar{\sigma}_r, \bar{\sigma}_{\theta r}$ і тангенціальні $-\bar{\tau}_{r\theta}$), а також радіальні \bar{w}_r та тангенціальні \bar{v}_θ переміщення кожного пружного шару, за допомогою невідомих поки констант: $a_0^{(i)}, b_0^{(i)}, a_1^{(i)}, b_1^{(i)}, c_1^{(i)}, d_1^{(i)}, d_1^{\prime(i)}, a_n^{(i)}, b_n^{(i)}, c_n^{(i)}, d_n^{(i)}$, де $i=1, 2, 3$; $n=2, 3, 4, \dots$

$$\bar{\sigma}_r = a_0^{(i)} \rho^{-2} + b_0^{(i)} + (2b_1^{(i)} \rho - 2c_1^{(i)} \rho^{-3} + d_1^{\prime(i)} \rho^{-1} + d_1^{(i)} \rho^{-1}) \cos \theta + \sum_{n=2}^{\infty} [a_n^{(i)} (n - n^2) \rho^{-n-2} + b_n^{(i)} (n + 2 - n^2) \rho^n - c_n^{(i)} (n + n^2) \rho^{-n-2} + d_n^{(i)} (-n + 2 - n^2) \rho^{-n}] \cos n\theta, (1)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta r} = -a_0^{(i)} \rho^{-2} + b_0^{(i)} + (6b_1^{(i)} \rho - 2c_1^{(i)} \rho^{-3} + d_1^{\prime(i)} \rho^{-1}) \cos \theta + \sum_{n=2}^{\infty} [a_n^{(i)} (n^2 - n) \rho^{-n-2} + b_n^{(i)} (n^2 + 3n + 2) \rho^n - c_n^{(i)} (n^2 + n) \rho^{-n-2} + d_n^{(i)} (n^2 - 3n + 2) \rho^{-n}] \cos n\theta; (2)$$

$$\bar{\tau}_{r\theta} = (2b_1^{(i)} \rho - 2c_1^{(i)} \rho^{-3} + d_1^{\prime(i)} \rho^{-1}) \sin \theta + \sum_{n=2}^{\infty} [a_n^{(i)} (n^2 - n) \rho^{-n-2} + b_n^{(i)} (n^2 + n) \rho^n + c_n^{(i)} (-n^2 - n) \rho^{-n-2} + d_n^{(i)} (-n^2 + n) \rho^{-n}] \sin n\theta; (3)$$

$$\bar{w}_r^{(i)} + E_3 / E_i \left\{ -(A^{(i)} + B^{(i)}) a_0^{(i)} \rho^{-1} + (A^{(i)} - B^{(i)}) b_0^{(i)} \rho + [a_1^{(i)} + (A^{(i)} - 3B^{(i)}) b_1^{(i)} \rho^2 + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + (A^{(i)} + B^{(i)})c_1^{(i)}\rho^{-2} + ((A^{(i)} - B^{(i)})d_1^{(i)} + A^{(i)}d_1^{(i)}\ln\rho)\cos\theta + \\
& + \sum_{n=2}^{\infty} \left[-(A^{(i)} + B^{(i)})n\rho^{n-1} - a_n^{(i)} - (A^{(i)}(n-2) + B^{(i)}(n+2))\rho^{n+1}b_n^{(i)} + \right. \\
& \left. + (A^{(i)} + B^{(i)})n\rho^{-n-2}c_n^{(i)} + (A^{(i)}(n+2) + B^{(i)}(n-2))\rho^{-n+1}d_n^{(i)} \right] \cos n\theta \}; \quad (4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\bar{v}^{(i)} = E_3 / E_i \{ & -a_1^{(i)} + (5A^{(i)} + B^{(i)})b_1^{(i)}\rho^2 + (A^{(i)} + B^{(i)})\rho^{-2}c_1^{(i)} + (A^{(i)} - B^{(i)})d_1^{(i)} - \\
& - B^{(i)}d_1^{(i)} - [A^{(i)}d_1^{(i)} + (A^{(i)} - B^{(i)})d_1^{(i)}]\ln\rho \} \sin\theta + \\
& + \sum_{n=2}^{\infty} \left[a_n^{(i)}n(A^{(i)} + B^{(i)})\rho^{n-1} + (A^{(i)}(n+4) + B^{(i)}n)\rho^{n+1}b_n^{(i)} + \right. \\
& \left. + (A^{(i)} + B^{(i)})n\rho^{-n-1}c_n^{(i)} + (A^{(i)}(n-4) + B^{(i)}n)\rho^{-n+1}d_n^{(i)} \right] \sin n\theta \}. \quad (5)
\end{aligned}$$

Тут E_i – модуль пружності відповідних шарів

$$\bar{\sigma}_{ri} = \sigma_{ri} / E_3; \bar{\sigma}_{\theta i} = \sigma_{\theta i} / E_3; \bar{\tau}_{r\theta i} = \tau_{r\theta i} / E_3; \bar{w}_{ri} = w_i / r_4;$$

$$\bar{v}_i = v_i / r_4; \rho_i = r_i / r_4; A^{(i)} = 1 - \mu_i^2; B^i = \mu_i(1 + \mu),$$

μ_i – коефіцієнт Пуассона відповідних шарів.

Безрозмірні константи визначаємо за такими граничними умовами:

$$\bar{\sigma}_{ri} = \begin{cases} -\bar{p}(\theta), |\theta| < \theta_0, \\ 0, |\theta| > \theta_0 \end{cases}, \text{ якщо } \rho = 1; \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_{r\theta} = 0, \quad \text{якщо } \rho = 1; \quad (7)$$

$$\bar{w}_1 = \bar{v}_1 = 0, \quad \text{якщо } \rho = \rho_1; \quad (8)$$

$$\bar{w}_1 = \bar{w}_2; \bar{v}_1 = \bar{v}_2, \quad \text{якщо } \rho = \rho_2; \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}_{r1} = \bar{\sigma}_{r2}; \bar{\tau}_{r\theta 1} = \bar{\tau}_{r\theta 2}, \quad \text{якщо } \rho = \rho_2; \quad (10)$$

$$\bar{w}_2 = \bar{w}_3; \bar{v}_2 = \bar{v}_3, \quad \text{якщо } \rho = \rho_3; \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_{r3} = \bar{\sigma}_{r4}; \bar{\tau}_{r\theta 3} = \bar{\tau}_{r\theta 4}, \quad \text{якщо } \rho = \rho_3, \quad (12)$$

де введено позначення

$$\rho_1 = r_1 / r_4; \rho_2 = r_2 / r_4; \rho_3 = r_3 / r_4; \bar{p}(\theta) = p(\theta) / E_3. \quad (13)$$

Для наближеного розв'язання сформульованої задачі приймаємо косиносоїдальний закон розподілення контактного тиску в робочій зоні, тобто

$$p(\theta) = p_0 \cos(\pi\theta / 2\theta_0), \quad (14)$$

тут p_0 і θ_0 – поки що невідомі параметри, які необхідно визначити.

Задовольняючи граничні умови (6)...(12), розкладемо функцію $\bar{p}(\theta)$ в ряд Фур'є у проміжки $(-\pi \leq \theta \leq \pi)$, дістанемо

$$\bar{p}(\theta) = \bar{A}_0 / 2 + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{A}_k \cos k\theta. \quad (15)$$

З урахуванням (14), безрозмірні коефіцієнти ряду Фур'є подамо у вигляді

$$\bar{A}_k = (p_0 / E_3) A_k, \quad (16)$$

де

$$A_k = (4\theta_0 \cos k\theta_0) / (\pi^2 - 4k^2\theta_0^2). \quad (17)$$

Використовуючи граничні умови (6)...(12) з урахуванням (1)...(5) і (15), можна скласти систему з тридцяти лінійних алгебраїчних рівнянь відносно тридцяти трьох невідомих

констант, які наведені вище. Ще три необхідні рівняння одержимо на підставі умови однозначності складової вектора переміщення пружних шарів покриття

$$d_1^{(i)} = -((A^{(i)} - B^{(i)}) / 4A^{(i)})d_1^{(i)}. \quad (18)$$

Аналіз одержаної системи цих 33 рівнянь дав змогу установити, що шукані константи є пропорційні відповідним коефіцієнтам ряду Фур'є функції $\bar{p}(\theta)$. Тому на підставі (4) і (16) функцію радіальних переміщень зовнішньої поверхні пружного шару 3 можна описати так:

$$\bar{w}^{(3)}(1, \theta) = (p_0 / E_3)f(\theta), \quad (19)$$

де

$$\begin{aligned} f(\theta) = & -(A^{(3)} + B^{(3)})\bar{a}_0^{(3)} + (A^{(3)} - B^{(3)})\bar{b}_0^{(3)} + [\bar{a}_1^{(3)} + (A^{(3)} - 3B^{(3)})\bar{b}_1^{(3)} + \\ & + (A^{(3)} + B^{(3)})\bar{c}_1^{(3)} \cos\theta + \sum_{n=2}^{\infty} [-(A^{(3)} + B^{(3)})n\bar{a}_n^{(3)} + (A^{(3)} + B^{(3)})n\bar{c}_n^{(3)} - (A^{(3)}(n-2) + \\ & + B^{(3)}(n+2))\bar{b}_n^{(3)} + (A^{(3)}(n+2) + B^{(3)}(n-2))\bar{d}_n^{(3)}] \cos n\theta. \end{aligned} \quad (20)$$

Безрозмірні константи $\bar{a}_0^{(3)}, \bar{b}_0^{(3)}, \bar{a}_1^{(3)}, \bar{b}_1^{(3)}, \bar{c}_1^{(3)}, \bar{a}_n^{(3)}, \bar{b}_n^{(3)}, \bar{c}_n^{(3)}, \bar{d}_n^{(3)}$ ($n=2, 3\dots$) визначаються розв'язанням простих алгебраїчних рівнянь з підстановкою в їхні праві частини безрозмірних коефіцієнтів, що визначаються за формулою (17). З іншого боку, у випадку, коли радіуси r_0 і r_4 мало відрізняються один від одного, можна скористатися геометричними їхніми залежностями та знайти найближчі значення радіальних переміщень $\bar{w}_k^{(3)}$ точок внутрішньої межі пружного шару 3 у безрозмірному вигляді

$$\bar{w}_k^{(3)} = w_k^{(3)} / r_4 = \bar{\delta} \cos\theta - \bar{\Delta}(1 - \cos\theta), |\theta| < \theta_0, \quad (21)$$

де $\bar{\delta} = \delta / r_4$, δ – радіальне зміщення точки першопочаткового дотику тіл, що входять в конструкцію.

Безрозмірний параметр $\bar{\Delta}$ визначаємо за залежністю

$$\bar{\Delta} = 1 - (r_0 / r_4). \quad (22)$$

Для наближеного виконання умови контакту необхідно, щоб функції (20) і (21) збіглися щонайменше в трьох точках зони дотику: $\theta = 0; \theta = \pm\theta_0$, що дозволяє скласти систему рівнянь

$$\begin{aligned} (p_0 / E_3)f(0) &= \bar{\delta}; \\ (p_0 / E_3)f(\theta_0) &= \bar{\delta} \cos\theta_0 - \bar{\Delta}(1 - \cos\theta_0), \end{aligned} \quad (23)$$

де $f(0)$ і $f(\theta_0)$ – значення функції (20) за умови, що $\theta = 0; \theta = \pm\theta_0$.

Зауважимо, що система (23) зв'язує між собою ці шукані параметри: $p_0, \bar{\delta}, \theta_0$.

На підставі умови статичної рівноваги твердого циліндра (рис. 1)

$$Q = r_4 \int_{-\theta_0}^{\theta_0} p(\theta) \cos\theta d\theta, \quad (24)$$

де Q – значення результуючого навантаження на одиницю довжини циліндра, тобто можна дістати ще одне рівняння.

З урахуванням (14) і (23) рівняння (24) після деяких простих перетворень можна звести до вигляду

$$Q = \left[(4\pi E_3 \Delta \theta_0 (1 - \cos\theta_0)) / (\pi^2 - 4\theta_0^2) (f(0) \cos\theta_0 - f(\theta_0)) \right] \cos\theta, \quad (25)$$

де $\Delta = r_4 - r_0$ – різниця між відповідними радіусами покриття.

Отримані залежності (23) і (25) є шуканими розв'язками сформульованої контактної задачі для тришарового пружного покриття циліндричного отвору, а за (1)...(5) можна визначити в кожному конкретному випадку напружений та деформований стан пружних шарів. Така попередня оцінка цих параметрів дає змогу дістати детальнішу інформацію про працездатність подібних конструкцій.

Для практичного використання отриманих залежностей розроблена комп'ютерна програма, яка дозволяє здійснювати кількісний аналіз основних характеристик з'єднання, якщо відомі навантаження Q , радіуси відповідних пружних шарів r_i ($i=0, 1, 2, 3, 4$), модулі пружності E_1, E_2, E_3 і коефіцієнти Пуассона μ_1, μ_2, μ_3 матеріалу шарів. Ця методика дає можливість визначити числове значення величини зони контакту, закон розподілення контактних тисків, описати напружений і деформований стани пружних шарів покриття.

Числове розв'язання задачі виконано для таких вихідних параметрів:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 1,43; \rho_2 = 1,28; \rho_3 = 1,14; \\ E_1 / E_2 &= 20; 30; E_2 / E_3 = 10; 20; \\ \mu_1 &= \mu_2 = \mu_3 = 0,5. \end{aligned}$$

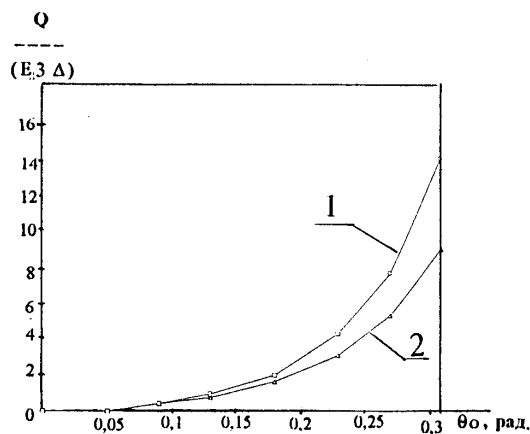


Рис.2. Залежність значення зони контакту від результуючої сили:

$$\begin{aligned} 1 - E_1/E_2=20 \text{ і } E_2/E_3=10; \\ 2 - E_1/E_2=30 \text{ і } E_2/E_3=20. \end{aligned}$$

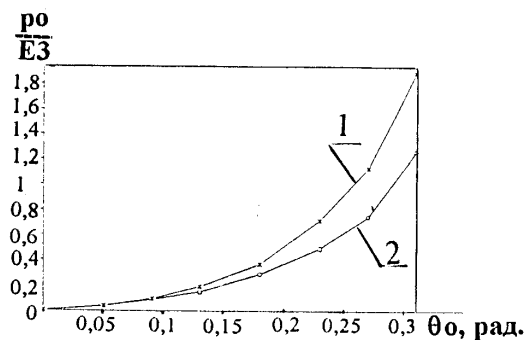


Рис.3. Залежність між відносним питомим тиском і значенням зони контакту:

$$\begin{aligned} 1 - E_1/E_2=20 \text{ і } E_2/E_3=10; \\ 2 - E_1/E_2=30 \text{ і } E_2/E_3=20. \end{aligned}$$

Найбільш характерні результати цього розв'язку показані на рис. 2 і 3, де побудовано графіки залежності значення зони контакту від значень результуючої сили та контактного тиску.

Використовуючи одержані графіки, можна вибрати раціональні характеристики матеріалу покриття з тим, щоб одержати бажане значення зони контакту та дещо впливати на значення питомого тиску між ланками кінематичної пари, які можна застосовувати в різних галузях машинобудування.

1. Божкова Л.В., Чебатюк А.Н. Взаимодействие кольца, жестко посаженого на абсолютно твердое тело с жестким основанием // Изв. ВУЗов. 1977. № 8. С. 16-22. 2.

Божкова Л.В., Рябов В.Г., Малащенко В.А. Контактная задача для кольцевого слоя произвольной толщины // Сбор. Львов. политехн. ин-та. 1989. № 2762. С. 11-19. 3. Малащенко В.О., Божкова Л.В., Рябов В.Г. Про контактне дотикання кільцевої оболонки і циліндра з урахуванням сил тертя // Вісн. Львів. політехн. ін-ту. № 259. С. 69-72. 4. Малащенко В.А., Божкова Л.В., Рябов В.Г. К вопросу контакта упругого слоя и жесткого цилиндра. Сбор. Львов. политехн. ин-та. "Влияние кинематических и динамических факторов на прочность, долговечность и износостойкость машин". Деп. в УкрНИИНТИ, 1992, Укр.-92. 5. Малащенко В.О., Божкова Л.В., Рябов В.Г., Матяж І.Ф. До питання про точність позиціювання робототехнічних засобів. Зб. тез доп. 1-го Міжнародн. симпозіуму Українських інж.-механ. у Львові, 1993, 1 с. 6. Тимошенко С.П., Гудьєр Дж. Теорія пружності. М., 1979.

УДК 621.876

Повідайло В.О., Гаврильченко О.В.

**ДУ "Львівська політехніка", кафедра "Автоматизація та комплексна механізація
машинобудівної промисловості"**

ВІБРАЦІЙНІ МІЖОПЕРАЦІЙНІ НАГРОМАДЖУВАЧІ НА ОСНОВІ ТРАНСПОРТНО-МАНІПУЛЯЦІЙНИХ МОДУЛІВ

© Повідайло В.О., Гаврильченко О.В., 2000

У роботі розглянуті конструкції міжопераційних нагромаджувачів побудованих на основі уніфікованих вібраційних транспортно-маніпулюючих модулів з електромагнітними вібробудниками.

The construction of accumulators for automatic manufacturing lines on the basis of vibrating transporting and manipulation modules are considered.

Подальше удосконалення вібраційних транспортно-маніпуляційних модулів з електромагнітними вібробудниками (розширення функціональних можливостей, підвищення швидкості транспортування, енергомісткості та довговічності, зниження маси, спрощення конструкції, повна віброізоляція від основи) дозволяє ефективно їх використовувати не тільки для формування транспортних систем, автоматичних ліній, але й для побудови міжопераційних нагромаджувачів [1].

Придатність до реверсування руху виробів, їх маніпулювання (переорієнтування), компактність конструкції створили передумови для компонування з уніфікованих модулів нагромаджувачів.

Запропоновані конструкції нагромаджувачів автоматичних ліній на основі транспортно-маніпуляційних модулів – це двомасні системи з коливаннями у протифазі, які забезпечують

- повну віброізоляцію модуля від основи за рахунок побудови пружної системи, що дає змогу досягти повної зрівноваженості динамічних навантажень;
- використання поверхонь обох мас як робочої (несучої) поверхні модуля;