

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРОРІЗНОЇ КОМПЕНСАЦІЙНОЇ МУФТИ

© Новіцький Я.М., Ступницький В.В., 2005

Розглянуто питання структурно-параметричної оптимізації нової конструкції пружної компенсаційної муфти, особливостей її експлуатації, переваги і недоліки. Основну увагу приділено питанням дослідження напружено-деформованого стану муфти та її тепловому розрахунку.

In the article the question of structural parameters optimization of a new construction of resilient compensative muff, features of its exploitation, advantages and failing, is considered. Basic attention is spared to optimum correlation of bending and contact tensions and their influence on the thermal state of construction.

Один із найбільш розповсюджених способів з'єднання неспіввісних валів – використання пружних компенсаційних муфт, характерною ознакою яких є наявність еластичного компенсаційного елемента, що деформується під час експлуатації муфти.

Еластичні компенсаційні елементи таких муфт, як правило, виготовляють із гумових (рідше поліуретанових) матеріалів, які неможливо експлуатувати за підвищених температур. Інший різновид компенсаційних елементів – металеві пружини та мембрани – стійкі до високих температур, але мають багато недоліків, а саме: висока вартість муфти, мала надійність, значні габаритні розміри (особливо, радіальні).

У цій роботі розглянуто нову конструкцію компенсаційної муфти, яка певною мірою позбавлена перелічених вище недоліків через такі особливості. По-перше, муфта виготовлена з однорідного металу, по-друге, вона є суцільною, тобто не має складальних одиниць, що істотно позначається на її вартості, надійності та радіальних габаритах.

Конструкція такої муфти показана на рис. 1. Як бачимо із рисунка, основою муфти є труба із пружинної сталі, в якій за допомогою електроерозійного верстата виконано дуже вузькі (0,25–0,75 мм) меандроподібні прорізи, що надають муфті високої податливості, що, як наслідок, уможливорює частково компенсувати неспіввісність валів.

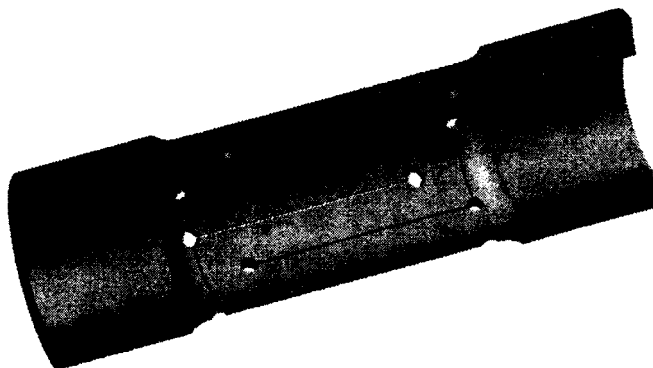


Рис. 1. Конструкція прорізної компенсаційної муфти

Особливістю технології електроерозійної обробки [4] є те, що пази можна виконувати після термооброблення заготовки, що унеможливорює короблення деталі, а також висока точність ( $\pm 0,01-0,02$  мм) оброблених пазів. Для знімання дефектного шару металу з поверхні пазів та покращання параметрів шорсткості ( $Ra\ 1-2,5 \rightarrow Ra\ 0,16-0,25$ ), а також для підвищення корозійної стійкості рекомендується [4] застосування електрохімічного полірування виробу.

Принцип дії муфти такий. У ненавантаженому стані муфта має високу податливість (рис. 2, область 1), що дає змогу легко з'єднати вали між собою. Під час навантаження муфти (передача крутного моменту) вузькі пази змикаються і жорсткість муфти різко зростає (область 3).

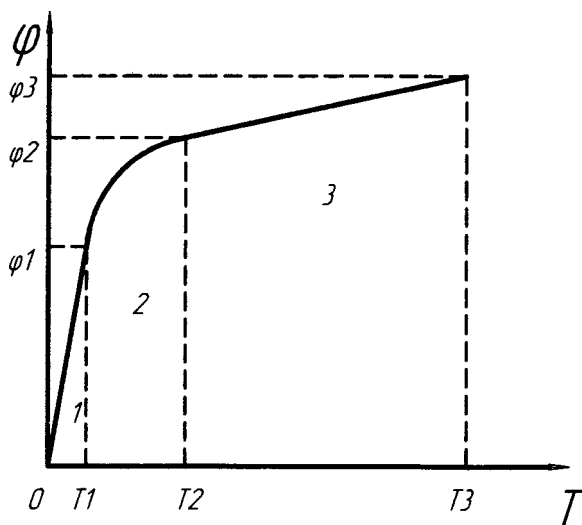


Рис. 2. Залежність кутової деформації муфти від моменту, що передається

Тобто напружено-деформований стан муфти характеризується напруженнями згину, які виникають в “пружинках” при з’єднанні валів та за деформації муфти до змикання пазів, і контактними напруженнями між “пружинками” за подальшого зростання крутного моменту (після змикання пазів).

Недоліком згинальних напружень є втомна міцність муфти, тому потрібно, за можливості, зменшувати як самі напруження, так і їх концентратори. Ці параметри регулюються переважно шириною прорізаного паза – чим вужчий паз, тим менша величина деформації пружинок, які входять у контакт між собою і, як наслідок, меншими будуть напруження. Концентрація напружень визначається діаметром попередньо просвердлених отворів (рис. 1), які замикають пази, та шорсткістю їх поверхні, тому їх потрібно, за можливості, виконувати більшими та якіснішими.

Недоліком контакту є нагрівання муфти внаслідок тертя у замкнутих пазах, тому контактні напруження також повинні обмежуватись.

Напружено-деформований стан конструкції як до контакту її елементів між собою (область 1, рис. 2), так і після завершення формування плями контакту (область 3, рис. 2), зручно аналізувати за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) [2] з використанням ЕОМ (рис. 4). Деформацію конструкції в області 2 (рис. 2) – ріст плями контакту під навантаженням та зменшення робочої довжини пружинок – доцільно виконувати аналітично, взявши за початкові умови дані з числового розрахунку в області 1.

Із аналізу роботи муфти випливає, що основним навантаженням на елементи конструкції є неспіввісність валів  $\Delta$  (рис. 3) (поперечна деформація муфти) та обертовий момент  $T$ , що передається муфтою (кручення муфти). Тобто пружні елементи муфти (до контакту між собою) навантажені складним згинальним моментом  $M_{зг.}$ , який складається із суми моментів  $M_x$ ,  $M_y$  та  $M_z$ . Моменти  $M_y$  та  $M_z$  є наслідком деформації муфти  $\Delta$  і/або  $\delta$  по осях  $Y$  та  $Z$ . Момент  $M_x$  виникає внаслідок кручення муфти обертовим моментом  $T$  на величину  $\varphi$  (рис. 2), що приводить до згину

пружних елементів муфти відносно осі  $X$  та їх кручення на величину  $\varphi$ , внаслідок чого в елементах виникає внутрішній крутний момент  $M_{кр}$ .

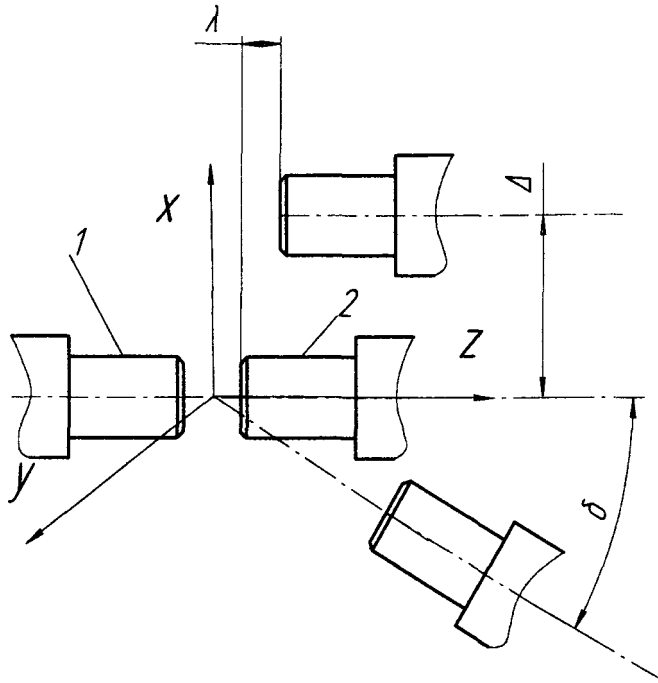


Рис. 3. Відхилення валів від ідеально правильного співвісного розташування

Як зазначалося вище, пружні елементи муфти вступають в контакт між собою під час зникнення зазора між ними, що є наслідком їх взаємної деформації.

Необхідно розрізнити деформацію елементів від з'єднання валів муфтою ( $L\Delta$ ) та деформацію елементів від передачі обертового моменту ( $L\varphi$ ).

Якщо деформація  $L\varphi$  за однакової жорсткості пружних елементів є однаковою для всіх елементів, то  $L\Delta$  є неоднаковою і її величина залежить від величини  $\Delta$  та кута повороту муфти відносно осі компенсації (рис. 4).

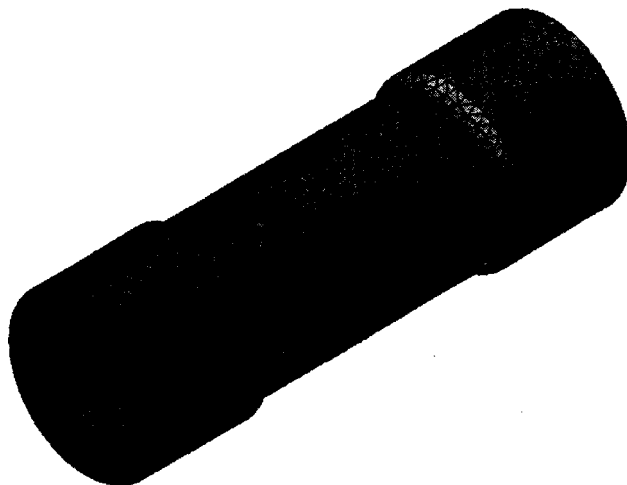


Рис. 4. Розбиття конструкції на скінченні елементи за допомогою ЕОМ

Якщо, наприклад, величина зміщення валів  $\Delta$  лежить на осі  $Y$  (рис. 4), то горизонтально розташовані елементи муфти деформуються в напрямку зміни (збільшення/зменшення) зазорів, а

вертикально – в поперечному до зазорів напрямку і, тому їх деформація безпосередньо не впливає на зміну зазора. Якщо муфту навантажити обертовим моментом  $T$ , то за деякого його значення, величина рівномірної деформації елементів  $L\phi$  приведе до контакту елементів, які розташовані поблизу горизонтальних зазорів. При цьому елементи, які розташовані біля вертикальних зазорів, в контакт між собою вступати не будуть. Оскільки муфта обертається відносно нерухомої осі зміщення валів, то елементи по чергову, з певним перекриттям, то вступатимуть в контакт, то виходитимуть з нього. Причому у муфт з парною кількістю елементів процес входження в контакт та вихід з нього відбуватиметься парами елементів (за умови абсолютно однакової жорсткості).

Еквівалентні напруження згину, які виникають під час експлуатації муфти, концентруються біля отворів, які замикають пази. На рис. 5 зображено картину еквівалентних напружень (за теорією еквівалентних напружень (4-та теорія міцності)), що виникають під час з'єднання валів та передачі такого граничного значення моменту, за якого відбувається замикання пазів ( $\Delta = 0,2$  мм;  $T = 40$  Нм).

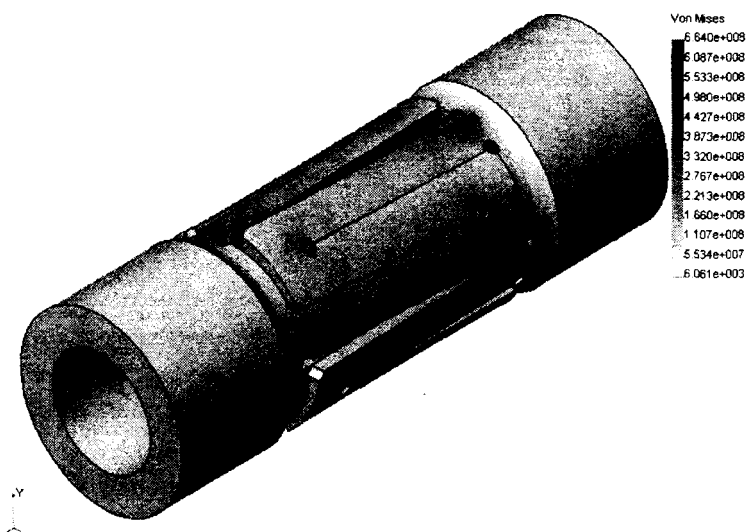


Рис. 5. Картина напружено-деформованого стану муфти (деформації перебільшені)

Подальше збільшення обертового моменту призводить до виникнення та зростання контактних напружень за незмінних напружень згину. Контактні напруження можна істотно зменшити, сформувавши конструктивно необхідну площу контакту (довжину контактної лінії). Якщо муфту припрацювати в середовищі абразивної суспензії із активним відведенням тепла на регульованих навантаженнях, то можна отримати досить великі площадки контакту. Як бачимо із рис. 5, вони формуються подвійно на один пружний елемент (2 пари тертя) біля отворів, що замикають пази. Причому максимумами контактних та еквівалентних згинальних напружень розташовані на різних боках пружних елементів. Те, що контактні та згинальні напруження додадуться, не погіршує ситуацію з двох причин. По-перше, напруження в зоні контакту не збігаються за напрямком, по-друге, вони порівняно невеликі. Наприклад, для цієї муфти за довжини контактної лінії 10 мм і товщини площадки 5 мм збільшення обертового моменту на 100 Нм після контакту ( $\Sigma 140$  Нм) викликає контактні напруження завбільшки 20 МПа.

Очевидно, що рекомендоване електрохімічне полірування муфти краще виконувати після її припрацювання.

Дещо іншою є ситуація з нагріванням, що виникає під час контакту пружних елементів муфти між собою. Як відомо [3], температура в зоні контакту залежить від потужності тертя та величини тепловідведення. Потужність тертя [1] визначається за формулою

$$P_T = \frac{2\Delta T f i \omega \Delta}{\sqrt{2d_c}}, \quad (1)$$

де  $\Delta T = T_{\text{ном}} - T_{\text{поч}}$  – різниця між номінальним обертовим моментом та значенням моменту, за якого починається контакт елементів конструкції;  $f$  – коефіцієнт тертя між елементами;  $i$  – кількість пар тертя;  $\omega$  – кутова частота обертання муфти;  $\Delta$  – величина допуску співвісності валів (поперечної деформації муфти);  $d_c$  – середній діаметр муфти (площини тертя).

Підставивши  $\Delta T = 100$  Нм;  $f = 0,2$ ;  $i = 2$ ;  $\omega = 314$  рад/с;  $\Delta = 2 \times 10^{-4}$  м;  $d_c = 55 \times 10^{-3}$  м, отримаємо  $P_T = 65$  Вт.

Тепловий розрахунок муфти зручно виконати методом скінченних елементів за допомогою ЕОМ. Коефіцієнт тепловіддачі муфти, що обертається за конвективного теплообміну з атмосферою  $\alpha = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>×°С) за температури доквілля 30 °С. Результат розрахунку показано на рис. 6. Як зрозуміло із картини температурного розподілу, максимальна температура знаходиться на середній ланці пружного елемента муфти, який нагрівається з обох боків і становить 106 °С. Мінімальна температура дорівнює 40 °С і знаходиться на краях муфти.

Як впливає із аналізу рівняння (1), максимальна величина температури залежить від  $\Delta T$  за інших незмінних чинників та умов, а за заданого значення  $T_{\text{ном}}$  – лише від  $T_{\text{поч}}$ .

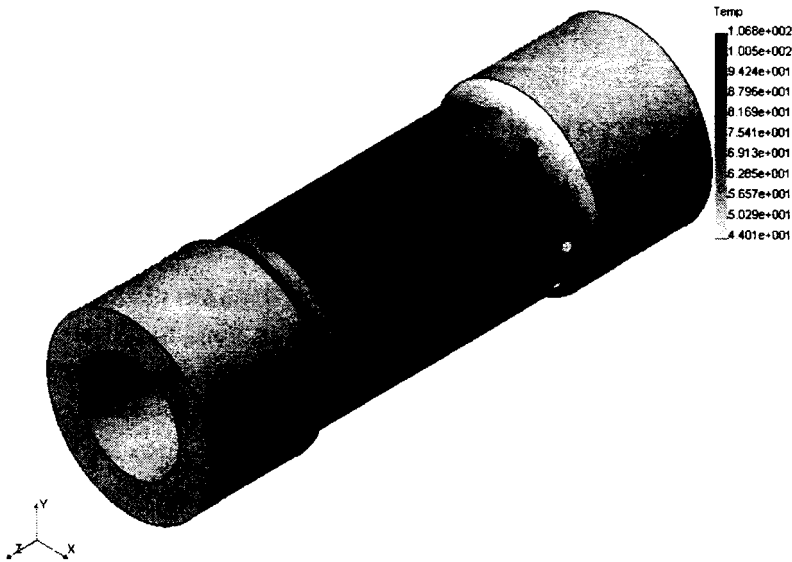


Рис. 6. Тепловий розрахунок муфти МСЕ за допомогою ЕОМ

Щоб оцінити відносні втрати енергії під час її передачі муфтою між валами, доцільно визначити коефіцієнт корисної дії. Як відомо

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_T}{P_{\text{вх}}} = 1 - \frac{P_T}{P_{\text{вх}}} =$$

$$= 1 - \frac{P_T}{T_{\text{ном}} \times \omega} = 1 - \frac{65}{140 \times 314} = 0,998.$$

Хоч це і не всі чинники, що впливають на формування ККД (впливом внутрішнього тертя в металі умовно знехтували), проте можна зробити висновок про порівняно малу роботу сил тертя. Цьому сприяють: низькі значення коефіцієнта тертя ( $f = 0,2$  – внаслідок використання мастила), мала кількість пар тертя ( $i = 2$ ), висока точність монтажу валів ( $\Delta = 0,2$  мм) та великі значення згинальних напружень в пружних елементах конструкції муфти.

**Висновки.** Отже, можна зробити висновок, що оптимізація робочої температури муфти та її напружено-деформованого стану може здійснюватися за рахунок ширини паза, оскільки *максимізація робочої температури муфти призводить до мінімізації згинальних напружень, і навпаки.*

До недоліків муфти можна віднести досить значні її аксіальні габарити та неможливість з'єднання валів нерухомих агрегатів (один з них, до з'єднання, повинен мати можливість руху в напрямку осі вала).

1. Детали машин. Расчет и конструирование: Справочник. В 3 т. Т. 1 / Под ред. Н.С. Ачеркана. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1968. – 440 с. 2. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / Под общ. ред. В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с. 3. Справочник машиностроителя. В 6 т. Т. 4, кн. 1 / Под ред. Н.С. Ачеркана. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 448 с. 4. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.

УДК 621.91.01

В.П. Свізінський, В.В. Ступницький, Я.М. Пелех  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронного машинобудування

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ СВЕРДЛА ДЛЯ ГЛИБОКОГО СВЕРДЛІННЯ ДЕТАЛЕЙ

© Свізінський В.П., Ступницький В.В., Пелех Я.М., 2005

Описано методику досліджень коливань свердла під час свердління глибоких отворів. Запропоновано аналітичні залежності, що уможливають проводити теоретичний аналіз впливу окремих параметрів режиму різання, властивостей оброблюваного матеріалу та конструкції інструменту на вібростійкість свердла.

In paper the technique of research of oscillations of a drill is circumscribed during drilling a deep hole. The analytical dependences are offered which allow to produce the theoretical analysis of influence of separate parameters of modes of cutting, properties of a worked stock and construction of the tool on vibrational stability of a drill.

Основний вплив на процес різання мають відносні коливання інструменту та деталі. Від цих коливань в кінцевому вигляді залежить як стійкість та продуктивність роботи металорізального інструменту, так і якість оброблюваної поверхні (хвилястість, шорсткість, наклеп, залишкові напруження тощо). Особливо велике значення надається автоколиванням нежорсткого інструменту, до якого можна віднести свердла для глибокого свердління. Причому найбільш впливовими коливаннями є крутні коливання інструменту [1].

За крутних коливань свердла справедлива рівність

$$\overline{M}_{ин} + \overline{M}_{оп} + \overline{M}_{пр} + \overline{M} = 0, \quad (1)$$

де  $\overline{M}_{ин}$ ,  $\overline{M}_{оп}$ ,  $\overline{M}_{пр}$ ,  $\overline{M}$  – моменти сил відповідно інерції, опору, пружності та різання.

Інакше це можна записати у вигляді

$$I \frac{d^2\varphi(t)}{d(t)^2} + \eta \frac{d\varphi(t)}{d(t)} + C\varphi(t) = M, \quad (2)$$

де  $I$  – приведений момент інерції свердла;  $\eta$  – узагальнений момент опору;  $C$  – коефіцієнт жорсткості.

За значних крутних коливань стандартного дволезового свердла для глибокого свердління (ГОСТ) праву частину рівності (2) можна записати в такий спосіб: