

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОТОКІВ ПРИ СКЛАДАННІ ПРЯМОБІЧНИХ ШЛІЦЬОВИХ З'ЄДНАНЬВ АВТОМАТИЧНОМУ РЕЖИМІ

С. Г. Бондарев, к.т.н., доцент

О. В. Рясна

Сумський національний аграрний університет

При виконанні математичних розрахунків теплообміну був використаний метод математичного моделювання теплових потоків при складанні шліцьових з'єднань з базуванням по ширині шліців для усього спектру типорозмірів. Завдяки запропонованій моделі можливо достатньо точно визначити температуру нагрівання охоплюючої втулки, що забезпечує ймовірність складання біля 100 відсотків.

Залишається проблемою складання шліцьових з'єднань з посадкою по ширині шліців Р10/к7 для вирішення поставленої мети були проаналізовані теплові потоки, які мають місце при термічному складанні шліцьових з'єднань. Для вирішення проблеми з нагріванням охоплюючої шліцьової втулки, так як її перегрівання спричиняє різку витрату часу, людських ресурсів та електричної енергії, а недостатнє нагрівання спричиняє передчасне схоплення втулки, яка ще не зайняла необхідне положення відносно охоплюючої поверхні.

Ключові слова: прямобічні шліцьові з'єднання, натяг по ширині шліців.

Постановка проблеми. У загальному вигляді прямобічних шліцьових з'єднань з центруванням по бічним поверхням, для перехідної посадки Р10/к7, яка містить максимальний натяг рис. 1.

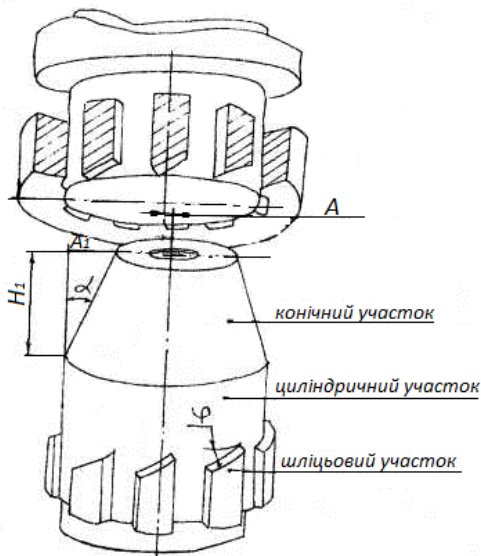


Рис.1.Шліцьова пара під час складання [1].

Вільне, без заїдання, чи заклинювання переміщення шліцьової втулки, відносно шліцьового вала, для перехідних посадок, можливе при $\Delta b \gg 0$, де Δb - зазор між поверхнями базування шліцьового з'єднання, і раціонально забезпечується лише за рахунок температурних деформацій деталей з'єднання. Разом з тим, зміна температури деталей пов'язана з додатковими витратами, та найчастіше сприяє погіршенню якості виробу.

Аналіз останніх досягнень. У зв'язку з незначними розмірами деталей припустимо, що температурне поле в них рівномірне, оскільки при цьому температурна деформація деталей також рівномірна, а збільшення відстані між двома протилежними площинами шліця дорівнює:

$$\Delta b_{em} = \alpha b (T - T_0),$$

де Δb_{em} збільшення ширини шліца b втулки, утворене в результаті її нагрівання від T_0 до T ;
 α - коефіцієнт лінійного розширення матеріалу.

При посадці з натягом ширина зуба:

$$b_e \geq b_{em}, b_e = b + \Delta b_e,$$

$$b_{em} = b + \Delta b_{em}, |\Delta b_e| \ll b, |\Delta b_{em}| \ll b,$$

deb_e - ширина шліця вала;

b_{em} - ширина шліцьового паза втулки;

b - номінальний розмір шліца;

Δb_e - збільшення ширини шліця b втулки, утворене в результаті її охолодження від T_0 до $-T$;

Δb_{em} - збільшення ширини шліця b втулки, утворене в разі її нагрівання, від T_0 до $+T$;

Δb_{min} - мінімальний складальний зазор між поверхнями базування.

Постановка задачі.

Розробка математичної моделі теплообміну між приєднувальною шліцьовою втулкою та валом упродовж відносного руху до закінчення процесу складання.

Методи рішення. Для того, щоб шліцьова втулка безперешкодно зайняла своє місце на валу, необхідно забезпечити умови; $b_e < b_{em}$, або $b_{em} - b_e = \Delta b_{min} > 0$. Величина Δb_{min} визначається температурними деформаціями деталей у кінцевий момент часу складання і температурою:

$$\Delta b_{min} = \Delta b_{em} - \Delta b_{e\text{вала}} + b(\alpha_{em} T_{em} - \alpha_e T_e + T_0(\alpha_e - \alpha_{em})) \quad (1)$$

Якщо шліцьовий вал та втулка виготовлені з одного матеріалу, тоді

$$\alpha_{em} = \alpha_e = \alpha \text{ і рівність (1) прийме вид:}$$

$$\Delta b_{min} = \Delta b_{em} - \Delta b_e + b\alpha(T_{em} - T_e). \quad (2)$$

У цьому випадку задача полягає у визначенні таких температур вала T_{e1} та втулки T_{em1} на початку, які б під час складання, при кімнатній температурі T_e забезпечували при завершенні технологічної операції, відповідну температуру $T_{e,3}$ та $T_{em,3}$, що гарантує зазор між базовими поверхнями $\Delta b_k = \Delta b_{min} > 0$.

Побудуємо математичну модель процесу теплообміну між шліцьовою парою. Нехай з'єднання складається зі шліцьового валу масою m_e з питомою теплоємністю C_e , та втулкою, з масою m_{em} і питомою теплоємністю C_{em} , причому $m_e \gg m_{em}$. Процес складання можливо поділити на два етапи, сумарною тривалістю:

$$T_{\Sigma} = T_{повим.} + T_{е\epsilon}, \quad (3)$$

де $T_{возд.}$ час транспортування деталей від джерела термовпливу на складальну позицію $T_{вв} = T_1 + T_2 + T_3$ де $T_{вв}$ сумарний час переміщення шліцьової втулки по: T_1 - забірному конусу, T_2 - циліндричній ділянці; T_3 - шліцьовій ділянці вала до завершення процесу складання рис.1. На кожному етапі, процес теплообміну, як з навколишнім середовищем, так із елементами з'єднання протікає не однаково, тому розглянемо їх окремо.

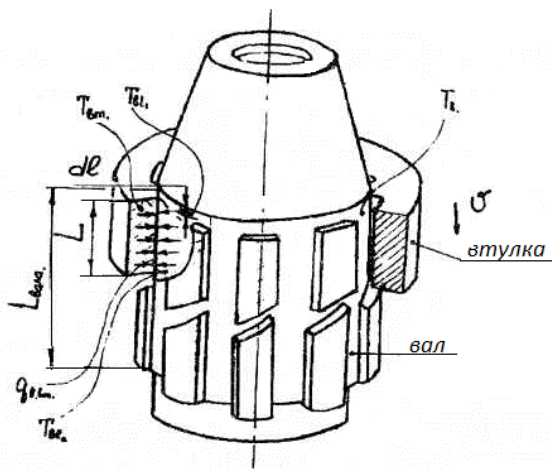


Рис.2. Поширення теплового потоку між шліцьовою втулкою та валом.

Мета роботи полягає в математичному моделюванні теплових потоків при автоматичному складанні прямобічних шліцьових з'єднань для усього спектру типорозмірів та посадок включаючи перехідну посадку.

Результати досліджень. Етап перший. У разі термовпливу, шліцьовий вал має температуру T_{e1} , втулка T_{em1} . При цьому, зміна температури деталей відбувається у разі тепловіддачі в навколишнє середовище зазвичай за допомогою зовнішніх поверхонь. Середній коефіцієнт тепловіддачі α_0 , враховує теплообмін між шліцьовою втулкою, або валом при охолодженні.

Площа розсіювання для втулки: $S_{em} = S_1 + 2S_2 + S_3$, де $S_1 = \pi d_1 L$ площа зовнішньої

циліндричної поверхні шліцьової втулки

рис.2; $S_2 = \frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} - zb \left(\frac{D-d}{2} \right)$ - площа торця

втулки; $S_3 = (\pi d + z(D-d))L$ - площа внутрішньої поверхні шліцьової втулки.

Площа розсіювання для вала: площа зовнішньої шліцьової поверхні вала - $S_e = (\pi d + z(D-d))L$,

периметр шліцьової поверхні - $\Pi = \pi d + z(D-d)$, площа поперечного перетину шліцьового вала

$$- S_{неп} = \frac{\pi d^2}{4} + zb \left(\frac{D-d}{2} \right)$$

Нестаціонарний теплообмін з навколишнім середовищем можливо описати двома рівняннями, складеними на підставі закону Ньютона - Римана:

$$C_e m_e dT_e = -\alpha_0 S_e (T_e - T_0) dt \quad (4)$$

$$C_{em} m_{em} dT_{em} = -\alpha_0 S_{em} (T_{em} - T_0) dt \quad (5)$$

Рішення цих рівнянь дає:

$$T_{e2} = (T_{e1} - T_0) e^{\frac{\alpha_0 S_e \tau}{C_e m_e}} + T_0 \quad (6)$$

$$T_{em2} = (T_{em1} - T_0) e^{\frac{\alpha_0 S_{em} \tau}{C_{em} m_{em}}} + T_0 \quad (7)$$

де T_{e2} і T_{em2} відповідно температура шліцьового вала, та втулки наприкінці першого етапу

Етап другий. На цьому етапі теплообмін відбувається між поверхнями контактування. Теплообмін між ними розглядається виходячи з рівності теплового

потoku по поверхнях контакту вала, втулки та зазору, по відповідних поверхнях $\Delta D, \Delta d, \Delta b$, які дорівнюють:

$$q = \lambda_{повим.} (T_{em} - T_e) \frac{1}{\Delta D} \quad (8)$$

$$q_d = \lambda_{повим.} (T_{em} - T_e) \frac{1}{\Delta d} \quad (9)$$

$$q_b = \lambda_{повимр.} (T_{em} - T_e) \frac{1}{\Delta b} \quad (10)$$

По всіх інших поверхнях, теплообмін відбувається з навколишнім середовищем. Звідси можливо розрахувати еквівалентний коефіцієнт теплообміну між валом та втулкою α_{e-em} . Введемо обмеження, що до кількості тепла, яке проходить через реальну поверхню теплообміну, та повинне дорівнювати кількості тепла, що проходить через еквівалентну поверхню. Якщо:

$$q_{\Sigma} S_{\Sigma} = q_D S_D + q_d S_d + q_b S_b, \quad (11)$$

$$\text{де } q_{\Sigma} S_{\Sigma} = \alpha_{e-em} S_3 (\Delta T_3 - \Delta T_{em}).$$

Тоді з обліком (9):

$$\alpha_{e-em} = \frac{\lambda_{повим}}{S_3} \left(\frac{S_d}{\Delta d_0 + \alpha \cdot d \cdot \Delta T_{e-em}} + \frac{S_D}{\Delta D_0 + \alpha \cdot D \cdot \Delta T_{e-em}} + \frac{S_b}{\Delta b_0 + \alpha \cdot b \cdot \Delta T_{e-em}} \right) \quad (12)$$

Оскільки рішення рівняння з урахуванням залежності $\alpha_{e-em} = f(\Delta T)$

ускладнено, будемо використовувати в першому наближенні середнє значення α_{e-em} в

інтервалі температур $(\Delta T_{\min}, \Delta T_{\min} + \Delta T)$:

$$\alpha_{e-ем} = \frac{\int_{\Delta T_{\min}}^{\Delta T_{\min} + \Delta T} \alpha_{e-ем}(\Delta T_{e-ем}) d(\Delta T_{e-ем})}{\Delta T}, \quad (13)$$

де ΔT_{\min} - мінімальна різниця температур між шліцьовими, валом та втулкою при якій існує мінімальний технологічний зазор по поверхням базування.

Під час $0 \leq \tau \leq \tau_2$, втулка пересувається по циліндричній ділянці вала. Якщо справедливо $q_D \approx q_b \rightarrow 0$ тоді:

$$\alpha_{e-ем} = k_{02} \ln \left(\frac{\Delta T_{\min} + \Delta T + T_d}{\Delta T_{\min} + T_d} \right), \quad (14)$$

$$\text{де } k_{02} = \frac{\lambda_{носим} S_d}{\alpha \cdot d \cdot S_3}, T_d = \frac{\Delta d_0}{d} \frac{1}{\alpha}, \Delta T_{\min} = T_{ем3} - T_{е3}$$

У період часу $\tau_2 \leq \tau \leq \tau_2 + \tau_3$ втулка переміщається по ділянці вала зі шліцами.

Якщо справедливо $q_d \ll q_b$, тоді

$$\alpha_{e-ем} = k_{03} \ln \left(\frac{\Delta T_{\min} + \Delta T + T_b}{\Delta T_{\min} + T_b} \right), \quad (15)$$

$$\text{де } k_{03} = \frac{\lambda_{носим} S_d}{\alpha \cdot b \cdot S_3}, T_d = \frac{\Delta b_0}{b} \frac{1}{\alpha}, \Delta T_{\min} = -\frac{\Delta b_{msn}}{b} \frac{1}{\alpha}$$

$$T_e = \frac{\int_0^L (T_{ем} + e^{-KL} (T_{ел1} - T_{ем})) dL}{L} = \frac{LT_{ем} + (T_{ел1} - T_{ем}) \left(-\frac{1}{K} e^{-KL} \right) \Big|_0^L}{L} = T_{ем} + \frac{T_{ел1} - T_{ем}}{KL} (1 - e^{-KL})$$

Тоді можливо записати систему рівнянь, що описує теплообмін:

$$\begin{cases} C_{ем} m_{ем} dT_{ем} = -d\tau \left(\alpha_{e-ем} S_3 \left(T_{ем} - \left(T_{ем} + \frac{(T_{ел1} - T_{ем})}{KL} (1 - e^{-KL}) \right) \right) + \right. \\ \left. + \alpha_0 (S_{ем} - S_3) (T_{ем} - T_0) \right) \\ C_e (m_e - \rho S_{сеч} V \tau) dT_{ел1} = -d\tau \alpha_0 (S_e - \Pi V \tau) (T_{ел1} - T_0) \end{cases} \quad (18)$$

Перше рівняння описує теплообмін між втулкою, валом та навколишнім середовищем, а друга зміну температури за час пересування втулки по валу.

$$T_{ем} = UV = T_0 + \frac{C_1}{C_m m_{ем}} \frac{T_{е2} - T_0}{\alpha - K_3} e^{-K_3 \tau} + C_0 e^{-\alpha \tau} \quad (19)$$

З урахуванням початкових умов: $T_{ем}(0) = T_{ем2}$ одержуємо:

$$T_{ем2} = T_0 + \frac{C_1}{C_m m_{ем} (\alpha - K_3)} (T_{е2} - T_0) + C_0 \quad (20)$$

де

$$C_0 = (T_{ем2} - T_0) - \frac{C_1}{C_m m_e (\alpha - K_3)} (T_{е2} - T_0) + T_0 + (T_{ем2} + T_0) e^{-\alpha \tau}$$

Підставляємо значення C_0 в (19) одержуємо температуру втулки на кінцевій стадії складання:

$$T_{ем3}(\tau) = \frac{C_1}{C_m m_e (\alpha - K_3)} \left(e^{-K_3 \tau} - e^{-\alpha \tau} \right) + T_0 + (T_{е2} - T_0) e^{-\alpha \tau} \quad (21)$$

Таким чином, для одержання гарантованого, мінімального технологічного зазору наприкінці складальної операції, з урахуванням теплових утрат, температуру

Зневажаємо теплообміном між перетинами вала, та вважаємо, що довжина вала рис.2 $L_B \gg L_{ем}$, де $L_{ем}$ довжина втулки.

Визначаємо зміну температури перетину вала, що виникає в разі пересування по ньому шліцьової втулки. Теплообмін через лінійний металевий контакт не значний:

$$T_{ел2} = T_{ем} + e^{-KL_{ем}} (T_{ел1} - T_{ем}), \quad (16)$$

де $T_{ел2}$ - температура вала, після виходу з втулки;

Π - периметр внутрішньої поверхні втулки, $\Pi = Z(b + D - d)$;

V - швидкість переміщення втулки по валу-

$$V = \frac{L_e}{\tau_{2.3}}; K = \frac{\Pi}{\rho C_m S_{сеч}} \frac{\alpha_{e-ем}}{V}$$

Знайдемо середню температуру шліцьового вала та втулки

$$T_e = \frac{\int_0^L T_{ел} dL}{L} = \frac{\int_0^L T_{ем} + e^{-KL} (T_{ел1} - T_{ем}) dL}{L} \quad (17)$$

нагрівання шліцьової втулки $T_{ем3}$ перед складанням, визначають за приведеною методикою.

Висновки. Одним зі шляхів виходу країни з промислової кризи є налагодження виробництва з подальшим випуском конкурентоспроможної продукції європейської якості.

Серед пріоритетних напрямів у промисловості є виробництво сучасної сільськогосподарської техніки, зокрема тракторів та навісного та причіпного технологічного обладнання до них, комбайнів, та іншого сучасного технічного та технологічного оснащення.

Наряду з високими вимогами до технологічних процесів виготовлення продукції існує ще один фактор який неможливо нехтувати. Це висококваліфіковані кадри, яких за останні роки надзвичайно бракує.

Виходом із цієї складної ситуації є перехід промисловості на часткову або повну автоматизацію виробничих процесів.

Прямобічні шліцьові з'єднання за останні

50-60 років набули неабиякої популярності завдяки високій компактності при передачі крутних моментів (включаючи знакозмінні), технологія їх виготовлення за останні роки істотно поліпшилась, але існують деякі проблеми при складанні прямобічних шліцьових з'єднань з базуванням по ширині шліців).

Надзвичайно проблематичною виявилось складання шліцьових з'єднань з посадкою по ширині шліців Р10/к7 для вирішення поставленої мети нами були проаналізовані теплові потоки, які мають місце при термічному складанні шліцьових з'єднань. Велика проблема існує з нагріванням охоплюючої шліцьової втулки, оскільки її перегрівання спричиняє різку витрату часу, людських ресурсів та електричної енергії, а недогрівання спричиняє передчасне схоплення втулки, яка ще не зайняла необхідне положення відносно охоплюваної поверхні.

У даній статті нами була запропонована математична модель теплових потоків при складанні шліцьових з'єднань з базуванням по ширині шліців для усього спектру типорозмірів. Завдяки запропонованій моделі можливо достатньо точно визначити температуру нагрівання охоплюючої втулки, що забезпечує ймовірність складання не менше, ніж 98 відсотків.

Список використаної літератури:

1. Бондарев С.Г., Захаров Н.В. «Шліцьове з'єднання і спосіб його складання» Патент №23365 А Україна F16D1/06-Опубл. 31.08.98 Бюл №4.

Бондарев С.Г., Рясна О.В. Математическое моделирование технологических потоков при составлении прямобочных шлицевых соединений в автоматическом режиме

При выполнении математических расчетов теплообмена был использован метод математического моделирования тепловых потоков при сборке шлицевых соединений с базированием по ширине шлицев для всего спектра типоразмеров. Благодаря предложенной модели, возможно достаточно точно определить температуру нагрева охватывающей втулки, что обеспечивает вероятность сборки около 100 процентов.

Остается проблемой сборки шлицевых соединений с посадкой по ширине шлицев P10/k7, для решения поставленной цели были проанализированы тепловые потоки, которые имеют место при термической сборке шлицевых соединений. Для решения проблемы с нагревом охватывающей шлицевой втулки, так как ее перегрев влечет за собой резкую потерю времени, человеческих ресурсов и электрической энергии, а недостаточный нагрев вызывает преждевременное схватывание втулки, которая еще не заняла необходимое положение относительно охватываемой поверхности.

Ключевые слова: прямобочные шлицевые соединения, натяжение по ширине шлицев.

Bondarev S., Ryasna O. Mathematical modeling of process flows when compiling sided splines in automatic mode

Summary. When performing mathematical calculations heat transfer method was used mathematical modeling of heat flow in the Assembly splines based on the width of the slots for the full range of sizes. Thanks to the proposed model, it is possible to accurately determine the temperature of the heating of the covering sleeve, which provides the probability of an Assembly of about 100 percent.

Remains the problem of Assembly splined connections with landing the width of the slots P10/K7, to address this goal were analyzed heat fluxes that occur during heat Assembly splines. To solve the heating covering splined bushings, since overheating leads to an abrupt loss of time, human resources and electric power, and insufficient heating causes premature adhesion of the sleeve, which is not yet at the desired position relative to the covered surface.

Keywords: sided, slip-joint, the tension across the width of the slots.

Стаття надійшла в редакцію: 03.03.2015р.

Рецензент: д.т.н., проф. Павлюченко А.М.