

© Резніченко М.К.

## **ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В З'ЄДНАННЯХ З НАТЯГОМ ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАГРІВІ**

### **1. Постановка проблеми**

Найважливішою проблемою машинобудівного комплексу України є підвищення конкурентоспроможності продукції за рахунок поліпшення її якості при зменшенні собівартості. Державна програма «Ресурсозберігаючі технології і новітнє обладнання в енергетиці» вимагає створення як принципово нових технологій, так і розвитку сучасних, зокрема зниження енерговитрат і дотримання екологічної чистоти при їх впровадженні.

З'єднання з натягом, що є поширеними з'єднаннями, в подійомно-транспортних машинах при технології збирання з нагрівом мають вищу міцність і надійність, ніж отримувані запресовкою. Такі з'єднання зазвичай і розбираються тільки з використанням нагріву, оскільки розпресовка часто призводить до пошкодження деталей. Особливо ефективною є технологія з прямим індукційним нагрівом струмами промислової частоти із-за зручності подачі і стабільності характеристик енергоносія, відсутності забруднення середовища, можливої високої концентрації потужності, гнучкості управління, точності регулювання температури та інших факторів.

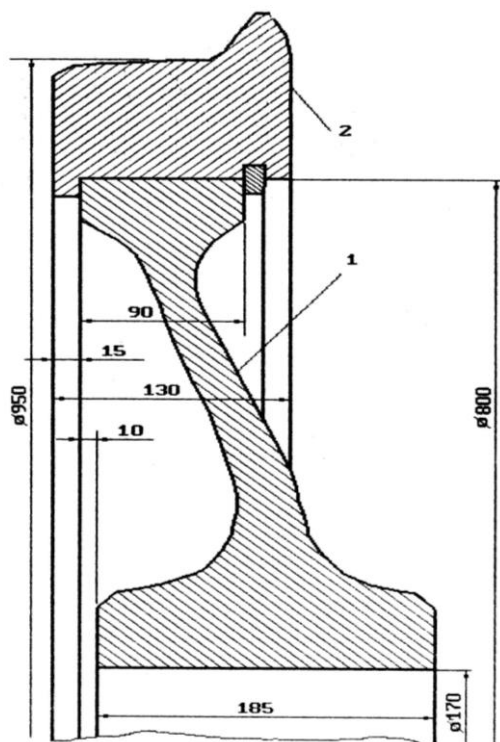
Проте технології з нагрівом досить енергоємні. Існуючі теоретичні розробки і практичні рекомендації пов'язані з конкретними виробами і конкретними типами процесів складання або розбирання.

Вимоги отримання виробів високої якості сприяють переведенню більш складних з'єднань з натягом з технології запресовки і розпресовки на технологію з індукційним нагрівом, що робить необхідним підвищення її ефективності.

Отже, нині об'єктивно постала науково-технічна проблема підвищення якості складання і розбирання з'єднань з натягом при одночасному зниженні енерговитрат, що неможливо без теоретичних розробок і науково обґрунтованих практичних рекомендацій. Проблема має важливе народногосподарське значення, оскільки її вирішення дозволить створити конкурентоспроможні, екологічно чисті технологічні процеси, надійне устаткування високого технічного рівня з малим енергоспоживанням для різних галузей машинобудування.

## 2. Аналіз досліджень

Аналіз досліджень якості технології з нагрівом і отримуваних виробів розглядалися з точки зору досягнення заданих значень і розподілів температур по деталях. Основоположні дослідження підвищення несучої здатності з'єднань з натягом і збереження посадочних поверхонь деталей виконані Боровником Г.А. (1956р.), Андреевим Г.Я. (1958р.).



**Рис. 1** - Колесо тепловозу ТГМ-40: 1 – колісний центр; 2 – бандаж

Питання структурних перетворень в металі при термодії були в центрі уваги Зенкіна А.С. (1978р.). Група вчених займалася використанням

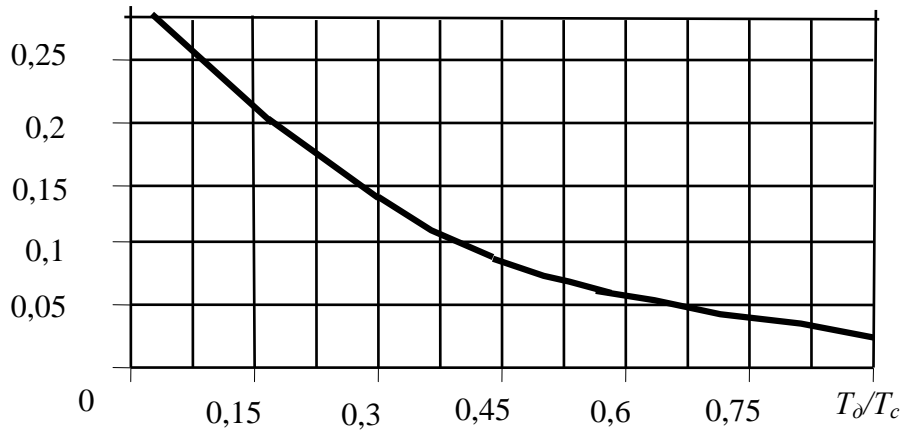
неруйнуючого контролю міцності з'єднань: Решетов Д.Н. (1965р.), Корсаков В.С. (1971р.), Максак В.І. (1975р.), Арпентьев Б.М., Зенкін А.С. (1985-1986р.), а перші дослідження точності положення деталей виконані Арпентьевим Б.М. (1986 р.).

Дослідження в області локалізації нагріву при складанні та розбиранні, втрат теплової енергії деталями в навколишнє середовище, переходу теплоти в охоплюючу деталь, раціональний просторовий розподіл теплової енергії проводили Корсаков В.С. (1961р.), Андреев Г.Я., (1962р.), Лактіонов Н.М. (1979р.), Арпентьев Б.М. (1987р.), Куцин А.Н. (1999р.). Ці розробки можуть бути базою для досліджень якості виробів, отриманих при збиранні та розбиранні, і побудови енергозберігаючих технологій.

### **3. Виклад основного матеріалу**

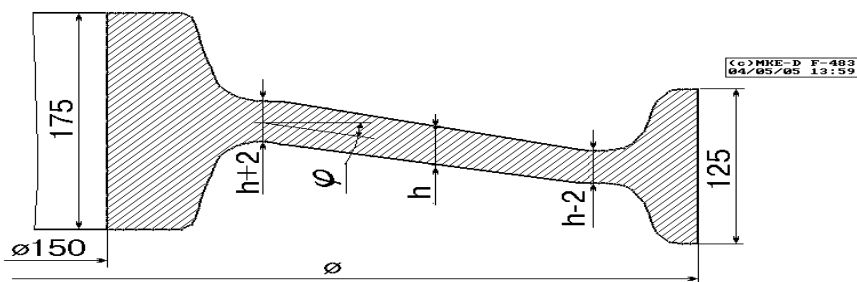
Необхідно мати фізико-математичні моделі, що встановлюють взаємозв'язок теплової енергії, температурного і поля напруги в деталях, які дозволяють мінімізувати енерговитрати при забезпеченні якості ТП. Деталі з маточинами дають можливість зменшувати енерговитрати за рахунок локалізації нагріву, але необхідно не перевищувати допустиму матеріалом напругу. Це досягається оптимальним розподілом температур. Прикладом деталі з маточиною є колісний центр кранового колеса, або тепловоза ТГМ - 40 (рис. 1).

Витрата енергії при індукційному нагріві може бути істотно знижена за рахунок його локальності. Наприклад, для деталей з конструкційної сталі, що мають маточину з диском, в залежності від розмірів і перепаду температур між ними економія теплової енергії при обмеженнях по напрузі може змінюватися в межах від 2% до 27%. На рис.2 показано вимірювання величини економії енергії для деталі з відношенням посадочного діаметру  $d$  до діаметру маточини  $D_c - 1,5$ , діаметру диску до  $D_c - 1,8$  і товщини диску  $h$  до довжини маточини  $0,3$ .

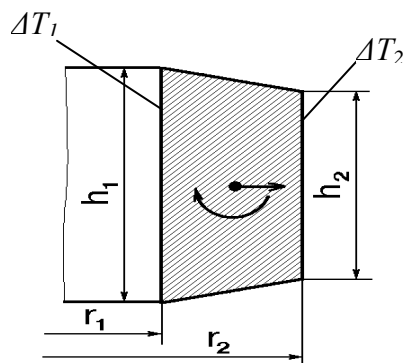


**Рис. 2** - Зміни величини економії теплової енергії  $\Delta Q$  при різних відношеннях температур нагріву диску  $T_d$  і маточини  $T_c$

Враховуючи, що складання з термодією підвищує міцність з'єднання з натягом у деталей, що мають маточину, необхідно завжди зменшувати її масу, що



**Рис. 3** - Схема конструкції центра колеса тепловоза ТГМ забезпечить зниження витрати теплової енергії.



**Рис. 4** - Елемент «кільце»

На прикладі конструкції центра колеса тепловоза ТГМ - 40 (рис.3) було досліджено напружено-деформований стан (НДС) при локальному нагріві маточини. Побудовано модель, яка описує конструкцію центра колеса як пружну систему, що складається з кілець (рис.4) і оболонок лінійно-змінної товщини

(рис.5).

Кут нахилу оболонок  $\varphi$  і її товщина  $h$  може мінятися. Модель дозволяє аналізувати вплив змін в конструкції і режимах нагріву на НДС. Система рівнянь, які описують пружну деформацію твердого тіла, включає рівняння

рівноваги  $\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \sigma_{ij} + X_j = 0; \quad j = \overline{1,3};$  рівняння зв'язку між деформаціями і

переміщеннями (рівняння Коші):  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad i, j = \overline{1,3};$ .

Закон Гука з урахуванням температурних деформацій  $\varepsilon^{(0)}$ :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0 \frac{3\nu}{1+\nu} \right) + \delta_{ij} \varepsilon^{(0)}; \quad i, j = \overline{1,3}.$$

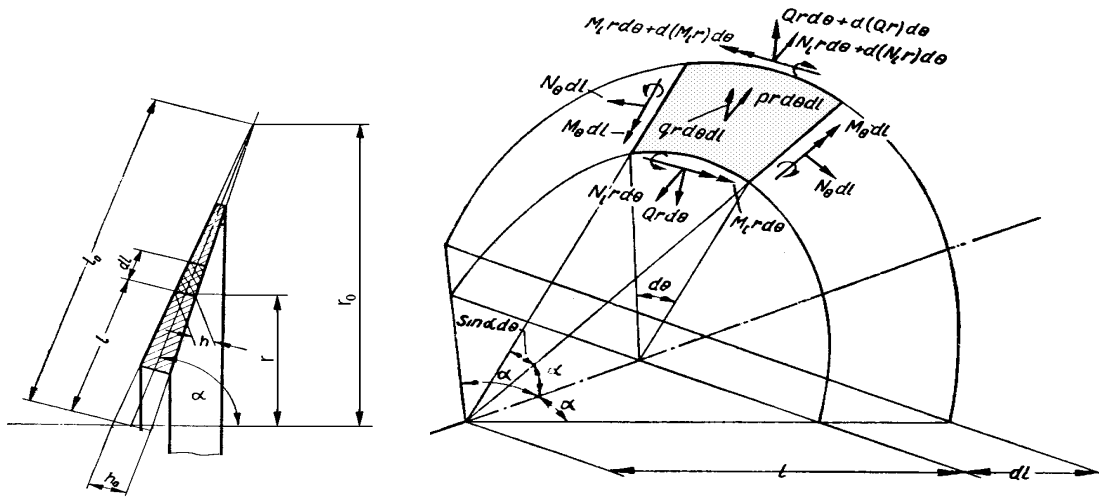


Рис. 5 - Елемент «оболонка»

Тут  $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$  – компоненти тензорів напруги і деформацій;  $X_j$  - проекції на осі координат об'ємних сил, віднесені до одиниці об'єму;  $x_j$  - компоненти координати точки недеформованого тіла;  $u_i$  – проекції вектора переміщень

точки тіла;  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j; \end{cases}$  - символ Кронекера;  $G = E/(2 + 2\nu)$  – модуль

зрушення;  $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$  – середня нормальна напруга;

$\varepsilon_0 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)/3$  – середнє відносне подовження.

При цьому на частини поверхні тіла можуть бути задані граничні

умови в напругах  $X_{iv} = \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} l_j; \quad i = \overline{1,3}$  або в переміщеннях  $u_i = g_i; \quad i = \overline{1,3};$  де

$X_{iv}$  – компоненти поверхневих напруг;  $g_i$  – переміщень на поверхні;  $l_j$  – косинуси кутів між координатними вісями і нормаллю до площадки.

Тоді:

$$N_r = \frac{E}{r_N} \left[ (1 + d \cdot \theta) I_R - I_T \right] - \text{сила}; \quad M_r = \frac{E}{r_M} \left[ \theta \cdot I_Z - \frac{N_r r_N d^1}{E} \right] - \text{момент}$$

$$\Delta T = T - T_0$$

$$\sigma_r = 0; \quad \sigma_\theta = \frac{1}{r} \left[ \frac{N_r r_N}{I_R} + z \frac{M_r r_M}{I_Z} \right] + E \left[ \frac{I_T}{r I_R} - \alpha \Delta T \right], \quad \sigma_e = \max[\sigma_{\theta/z = -h/2}; \sigma_{\theta/z = h/2}].$$

$$h = h_0 (1 - x); \quad x = l/l_0, \quad x = l_0/h_0 \cdot \text{ctg } \varphi.$$

Тут  $E$  - модуль пружності; де  $\Delta T = T - T_0$ ,  $T$  – середня по елементу температура, що приймається рівною температурі в центрі ваги вісьового перетину.

$$N_l = \sum_{n=1}^4 C_n N_l^{(n)} + \sum_{k=1}^2 N_l^{(k)}; \quad M_l = \sum_{n=1}^4 C_n M_l^{(n)} + \sum_{k=1}^2 M_l^{(k)};$$

$$N_\theta = \sum_{n=1}^4 C_n N_\theta^{(n)} + \sum_{k=1}^2 N_\theta^{(k)}; \quad M_\theta = \sum_{n=1}^4 C_n M_\theta^{(n)} + \sum_{k=1}^2 M_\theta^{(k)};$$

$$w = \sum_{n=1}^4 C_n w^{(n)} + \sum_{k=1}^2 w^{(k)} + C_5,$$

$N_l^{(n)}, N_\theta^{(n)}, M_l^{(n)}, M_\theta^{(n)}, w^{(n)}$  ( $n = \overline{1,4}$ ) – окремі розв'язки однорідних рівнянь,  $C_n$  ( $n = \overline{1,4}$ ) – постійні інтеграції.

$$\xi = x \left( \frac{N_\theta - \nu N_l}{E h} + \varepsilon_T \right) l_0 \sin \varphi; \quad - \text{радіальне переміщення}$$

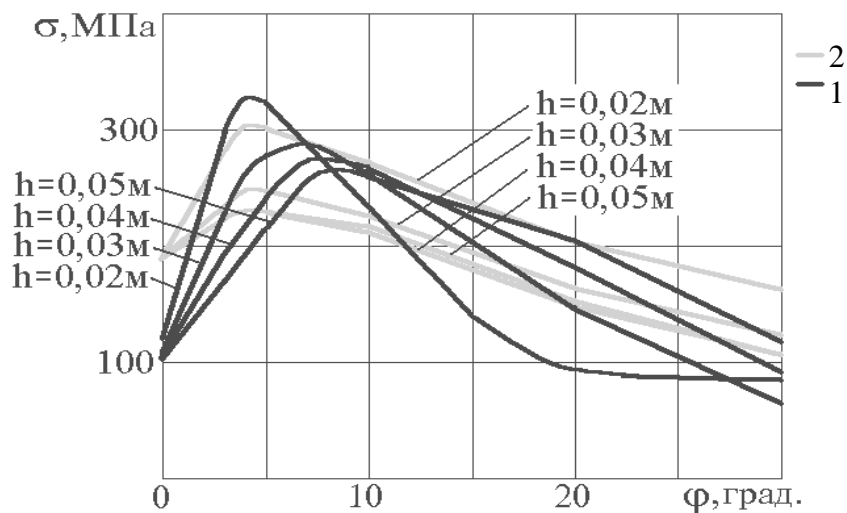
$$\zeta = -\frac{w}{\sin \varphi} + x \left( \frac{N_\theta - \nu N_l}{E h} + \varepsilon_T \right) l_0 \cos \varphi; \quad - \text{вісьове переміщення}$$

$$\theta = x l_0 \frac{12 (M_\theta - \nu M_l)}{E h^3}; \quad - \text{кут повороту нормалі до серединної поверхні}$$

$$\xi = \frac{l_0 x \sin \varphi}{E h_0^2 (-x)} \left[ \sum_{n=1}^4 C_n h_0 (N_\theta^{(n)} - \nu N_l^{(n)}) + h_0 \sum_{n=1}^2 (N_\theta^{(n)} - \nu N_l^{(n)}) + E h_0^2 \varepsilon_T (-x) \right];$$

$$\theta = \frac{12 l_0 x}{E h_0^3 (-x)} \left[ \sum_{n=1}^4 C_n (M_\theta^{(n)} - \nu M_l^{(n)}) + \sum_{n=1}^2 (M_\theta^{(n)} - \nu M_l^{(n)}) \right];$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_l \sigma_\theta}.$$



**Рис. 6** - Максимальні напруги в диску колісного центра при нагріванні маточини

#### 4. Висновки

Таким чином, було встановлено, що локальний індукційний нагрів зони отвору деталі, що конструктивно є маточною з диском, або маточною з диском та ободом, дозволяє заощадити теплову енергію до 25 % від повного нагріву деталі, а еквівалентні напруги  $\sigma_e$  в матеріалі диску, виникають в залежності від товщини його  $h$ , при кутах нахилу диска 4-8 градусів (рис. 6).

#### Список використаних джерел

1. Вигак В. М. Управление температурными напряжениями и перемещениями / В. М. Вигак. – К. : Наук. думка, 1988. –312 с.
2. Андреев Г. Я. Тепловая разборка соединений с натягом / Г. Я. Андреев, Б. М. Арпентьев, Б. Г. Кокшенев // Технология и организация производства. – 1972. – № 1. –С. 96–99.
3. Андреев А. Г. Оптимизация технологических нагревов бандажного колеса при сборке колесной пары тепловоза / А. Г. Андреев, А. В. Щепкин // Вісн. Інж. акад. України : інформ. 2-ої міжнар. наук.-техн.

конф. «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве».  
– К., 2000. – С. 415–418.

4. Андреев А. Г. Оптимизация нагрева при разборки деталей / А. Г. Андреев, Н. К. Резниченко, О. В. Щепкин // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХП». – Х., 2006. – № 32. – С. 3–8.
5. Андреев А. Г. Напряженно-деформированное состояние составных осесимметричных конструкций, собираемых с натягом при использовании нагрева / А. Г. Андреев, Н. К. Резниченко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХП». – Х., 2005. – № 47. – С. 3–8.

**Резниченко Н.К.** «Технологические основы энергосбережения в соединениях с натягом при индукционном нагреве».

Рассматривается вопрос локального индукционного нагрева при сборке и разборке соединений с учетом напряженно–деформированного состояния и энергосбережения.

**Резніченко М.К.** «Технологічні основи енергозбереження в з'єднаннях з натягом при індукційному нагріві».

Розглядається питання локального індукційного нагріву при збиранні та розбиранні з'єднань з урахуванням напружено – деформованого стану та енергозбереження.

**Reznichenko M.** «Technological bases of energy-savings in joints with tightness at the induction heating»

The question of the local induction heating is considered at assembling and sorting out of joints taking into account tense – the deformed state and energy-savings.