

**РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ПРИ ІНДУКЦІЙНО-ТЕПЛОВОМУ СКЛАДАННІ НЕРУХОМИХ З'ЄДНАНЬ**

©Резніченко М. К.

Українська інженерно-педагогічна академія

**Інформація про автора:**

**Резніченко Микола Карлович:** ORCID: 0000-0002-6989-01270; reznyk@ipma.com.ua, доктор технічних наук, професор, заступник керівника інженерної технології в машинобудуванні та індустріального виробництва, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

У статті розглянуті питання формування нерухомих з'єднань з використанням індукційного нагріву.

Як відомо, спосіб збирання таких з'єднань з попереднім нагріванням знижує трудомісткість і підвищує міцність з'єднання в 2-2,5 рази, що не менш важливо, особливо для відповідальних з'єднань.

З огляду на складне становище з енергоресурсами, в статті, надано рекомендації щодо використання технологій індукційного нагріву в залежності від нагату і зовнішнього діаметра деталі, що охолоджує, побудована номограма, що враховує температуру і контактний тиск.

Розроблено методику інформаційного супроводу технології індукційного нагріву деталей під складання, що дозволяє значно знизити температуру деталі, що охолоджує і контактні тиски в поєднанні.

**Ключові слова:** індукційний нагрів; з'єднання; технологія; нагати; інформаційний супровід; контактний тиск.

**Резніченко Н. К.** «Ресурсозберігаючі технології при індукційно-тепловій збірці неподвижних з'єднань».

В статье рассмотрены вопросы формирования неподвижных соединений с применением индукционного нагрева.

Как известно, способ сборки таких соединений с предварительным нагревом снижает трудоемкость и повышает прочность соединения в 2-2,5 раза, что немаловажно, особенно для ответственных соединений.

Учитывая сложное положение с энергоресурсами, в статье, даны рекомендации по использованию технологий индукционного нагрева в зависимости от нагата и наружного диаметра охлаждающей детали, построена номограмма, учитывающая температуру и контактное давление.

Разработана методика информационного сопровождения технологии индукционного нагрева деталей под сборку, позволяющая значительно снизить температуру охлаждающей детали и контактные давления в соединении.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев; соединение; технология; нагаты; информационное сопровождение; контактное давление.

**Resnychenko M.** "Resource-saving technology in induction-heat assembly fixed joints".

The article deals with the formation of fixed joints using induction heating.

As is known, the method of assembling such compounds with preheating reduces labor input and increases the bond strength by 2-2.5 times, which is important, especially for critical connections.

Given the difficult situation with energy resources, the article gives recommendations on the use of induction heating technologies in relation to the interference and outer diameter of the female part, and a nomogram is constructed that takes into account the temperature and contact pressure.

A technique for information support of induction heating technology for assembly parts has been developed, which makes it possible to significantly reduce the temperature of the female part and the contact pressure in the joint.

**Key words:** induction heating; connection; technology; interference; information support; contact pressure.

#### 1. Вступ

Державна програма «Ресурсозберігаючі технології і новітні обладнання в енергетиці» вимагає створення як принципово нових технологій, так і розвитку сучасних, зокрема зниження енерговитрат і дотримання екологічної чистоти при їх впровадженні.

Для складального виробництва, яке становить до 40 % від загальної трудомісткості виготовлення виробів, цей напрям особливо актуальний.

З'єднання з нагрівом, що є четвертими по поширеності з'єднаннями, при технології збирання з нагрівом мають вищу міцність і надійність, ніж отримувані запресовкою. Це забезпечило їм широке розповсюдження у важкому, транспортному, енергетичному, хімічному, нафтовому машинобудуванні, судноремонті і інших галузях машинобудування. 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 енергоси, відсутності забруднення середовища, можливої високої концентрації потужності, гнучкості управління, точності регулювання температури та інших факторів.

#### 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Якщо технології з нагрівом і отримуваних виробів розглядалися з точки зору досягнення заданих значень і розподілів температур по деталях. Основні положення дослідження підвищення несучої здатності з'єднань з нагрівом і збереження посадочних поверхонь деталей виконані Боровником Г. А. (1956 р.), Андреевим Г. Я. (1958 р.). Питання структурних перетворень в металі при термодії були в центрі уваги Зенкіна А. С. (1978 р.). Група вчених займалася використанням неруйнуючого контролю міцності з'єднань: Решетов Д. Н. (1965 р.), Корсаков В. С. (1971 р.), Максак В. І. (1975 р.), Арпентьев Б. М., Зенкі А. С. (1985-1986 р.), 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 навоколишнє середовище, переходу теплоти в охолоджуючу деталь, раціональний просторовий розподіл теплової енергії проводили Корсаков В. С. (1961 р.), Андреев Г. Я. (1962 р.), Лактюнов Н. М. (1979 р.), Арпентьев Б. М.

(1987 р.), Куцун А. Н. (1999 р.). Ці розробки можуть бути базою для досліджень якості виробів, отриманих при збиранні та розбиранні, і побудови енергозберігаючих технологій. Мета дослідження - фізико-математичні моделі, що встановлюють взаємозв'язок теплової енергії, температурного і поля напружень в деталях, що дозволяють мінімізувати енерговитрати при забезпеченні якості ТП. Немає також часових моделей якості технологічних систем (ТС), що реалізують процеси складання і розбирання з'єднань з нагрівом.

### 3. Викладення основного матеріалу

Отже, нині об'єктивно постала науково-технічна проблема підвищення якості складання і розбирання з'єднань з нагрівом 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.

Витрата енергії при вдувальному нагріві може бути кратно 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 напруженню може змінюватися в межах від 2% до 27%.

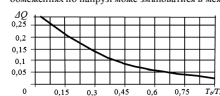


Рис. 1 – Зміни величини економії теплової енергії  $\Delta Q$  при рівних відношеннях температур нагріву диска  $T_2$  і маточини  $T_1$ .

На рис. 1 показано вимрювання 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  $0,3$ .

Враховуючи, що складання з термодією підвищує міцність з'єднання з нагрівом у деталей, що мають маточину, необхідно завжди зменшувати її масу, що забезпечить зниження витрати теплової енергії.

На прикладі конструкції центра колеса тепловоза ПТМ-40 (рис. 2) було досліджено напружено-деформований стан (НДС) при локальному нагріві маточини. Побудовано модель, яка описує конструкцію центра колеса як пружну систему, що складається з кільця (рис. 3) і облононок

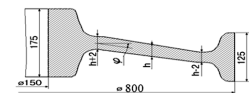


Рис. 2 – Схема конструкції центра колеса тепловоза ПТМ – 40

лінійно-змінної товщини (рис. 4). Кут нахилу облонок  $\phi$  і її товщина  $h$  може мінятися. Модель дозволяє аналізувати вплив змін в конструкції і режимах нагріву на НДС.

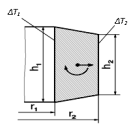


Рис. 3 – Елемент «квіцят»

Система рівнянь, які описують пружну деформацію твердого тіла, включає рівняння рівноваги  $\sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} + X_i = 0$ ,  $j = \overline{1,3}$ ; рівняння зв'язку між деформаціями і переміщеннями (рівняння Коші):  $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $i, j = \overline{1,3}$ ; закон Гука з урахуванням температурних деформацій  $\epsilon_{ij}(0)$ :

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

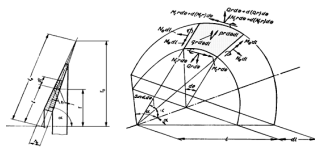


Рис. 4 – Елемент «оболонка»

Тут  $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$  – компоненти тензорів напруги і деформацій;  $X_j$  – проєкції на осі координат об'ємних сил, віднесені до одиниці об'єму;  $x_j$  – компоненти координати точки недеформованого тіла;  $u_i$  – проєкції 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;  $\sigma_m = (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)/3$  – середня нормальна напруга;  $\epsilon_m = (\epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z)/3$  – середнє відносне подовження.

При цьому на частині поверхні тіла можуть бути задані граничні умови в напругах  $X_n = \sum_{j=1}^3 \sigma_{nj} l_j$ ;  $i = \overline{1,3}$  або в переміщеннях  $u_i = g_i$ ;  $i = \overline{1,3}$  де  $X_n$  – компоненти поверхневих напруг;  $g_i$  – переміщення на поверхні;  $l_i$  – косинуси кутів між координатними осями і нормаллю до площини.

Тоді:

$$N_i = \frac{E}{r_\theta} [(u + d \cdot \theta) l_\theta - l_z] - \text{сила}; \quad M_i = \frac{E}{r_\theta} \left[ \theta \cdot l_z - \frac{N_i r_\theta d l_i}{E} \right] - \text{момент}$$

$$\sigma_r = 0; \sigma_z = \frac{1}{r} \left[ \frac{N_r r_z}{L_r} + \frac{M_r r_z}{L_r} \right] + E \left[ \frac{L_r}{r L_r} - \alpha \Delta T \right]; \sigma_\varphi = \max \{ \sigma_{\varphi_{z+1,2}}; \sigma_{\varphi_{z+1,2}} \}.$$

$$h = h_0(1-x); \quad x = l/L_0; \quad x = l_0/l_0 \cdot \cos \varphi.$$

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

$$N_j = \sum_{n=1}^k C_n N_j^{(n)} + \sum_{l=1}^m M_l^{(n)}; \quad M_j = \sum_{n=1}^k C_n M_j^{(n)} + \sum_{l=1}^m M_l^{(n)};$$

$$N_\theta = \sum_{n=1}^k C_n N_\theta^{(n)} + \sum_{l=1}^m M_l^{(n)}; \quad M_\theta = \sum_{n=1}^k C_n M_\theta^{(n)} + \sum_{l=1}^m M_l^{(n)};$$

$$w = \sum_{n=1}^k C_n w^{(n)} + \sum_{l=1}^m w_l^{(n)} + C_{11}.$$

$N^{(n)}, N_\theta^{(n)}, M^{(n)}, M_\theta^{(n)}, w^{(n)}$  ( $n = \overline{1, k}$ ) окремі розв'язки однорічних рівнянь,  $C_n$  ( $n = \overline{1, k}$ ) - постійні інтеграції.

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

$$\zeta = - \frac{w}{\sin \varphi} + x \left( \frac{N_\theta - \nu N_r}{E h} + \varepsilon_r \right) l_0 \cos \varphi - \text{осьове переміщення}$$

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

$$\xi = \frac{l_0 x \sin \varphi}{E h_0^2 (1-x)} \left[ \sum_{n=1}^k C_n h_0 (N_r^{(n)} - \nu N_\theta^{(n)}) + h_0 \sum_{l=1}^m (N_r^{(n)} - \nu N_\theta^{(n)}) + E h_0^2 \varepsilon_r (1-x) \right];$$

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

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_r \sigma_\varphi.$$

Було встановлено, що максимальні еквівалентні напрути  $\sigma_r$ , при тих же енерговитратах на локальний нагрів створюються в залежності від  $h$  при нахті диску від  $4^\circ$  до  $8^\circ$  (рис. 5).

Технологічна гнучкість виробництва і економічність визначаються уніфікацією ТП, яка базується на класифікації виробів і їх елементів. Класифікація дозволяє оцінювати ступінь складності ТП, а також вибирати тип відшукатора.

Розглянувши найбільш поширені посліди з відмісними Н7, Н8 при б6, б6, б6, б6, п7, x7, z7 і Н7, Р7, R7, S7, N8, US при б6, б7, б8 з'являється і стає типу „тузика і суцільний вал”.

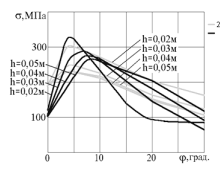


Рис. 5 – Максимальні напрути в диску молотного центра при нагріванні маточини 1 – зона біля маточини; 2 – зона біля ободу

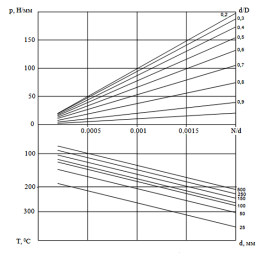


Рис. 6 – Номограма для визначення сфер застосування технології запресовування і технології з нагрівом: d – посадочний діаметр; D – зовнішній діаметр втулки; p – питомий тиск

або в існують силіної дії. Розроблено 4 схеми уніфікованих ПП складання і з – розбирання, що охоплюють роботу з дво- і багатосегментними складальними одиницями.

Для розрахунку циклів складання або розбирання багатосегментних складальних одиниць з використанням рівної кількості складального і нагрівального устаткування, з

побудовано номограму, яка дозволяє визначити галузі кращого застосування технології складання запресовкою чи з використанням нагріву (рис. 6). Прийнятні обмеження для запресовки – величина контактної тиску в посадці, що викликає задири поверхонь, в технології складання з нагрівом – це температура в 350 °С, як границя, як така, що не викликає зміни фізико-механічних властивостей матеріалу.

Повинити енергоємність ПП можливо за рахунок збільшення інформаційного ресурсу. При ПП

складання з використанням інформації про фактичну величину натягу в кожному з'єднанні зменшення енерговитрат на нагрів деталей, у порівнянні із традиційним складанням за максимальним натягом (Nmax), може скласти до 35 %, а при забезпеченні натягу близького до мінімального (Nmin), внаслідок групування деталей – до 50 %, при приточуванні деталей на Nmin – до 60 %.

Уніфіковані операції за технологічними принципами такі: базування, розташування осі базової деталі, послідовність складання або розбирання,

напрямок робочого руху, наявність

використанням теорії множин можна отримати загальну формулу, що дозволяє визначити його мінімальну величину.

$$\begin{aligned} \tau(O_1 \cup O_2 \cup \dots \cup O_n) = & \tau(O_1) + \tau(O_2) + \dots + \tau(O_n) - \\ & - [\tau(O_1 O_2) + \tau(O_1 O_3) + \dots + \tau(O_1 O_n)] + [\tau(O_2 O_3) + \tau(O_2 O_4) + \dots \\ & + \tau(O_2 O_n O_1)] - \dots + (-1)^{n+1} \tau(O_1 O_2 \dots O_n). \end{aligned}$$

Тут  $\tau$  – час;  $n$  – число  $O$  операцій (включно з транспортними).

Якість, отримувана при складанні або розбиранні виробів, розглядалась як забезпечення ТС заданих допусків різного роду контрольованих в часі параметрів. Оскільки для комплексної оцінки якості необхідно мати безрозмірні значення параметрів, запропоновано наступну залежність визначення в часі  $t$  безрозмірного параметра  $r_n(t)$

$$r_n(t) = (x_n(t) - x_n^* - x_{n, \text{opt}})$$

де  $x_n^*$  – допустима верхня межа  $n$ -ого параметра;  $x_{n, \text{opt}}$  – оптимальне (номінальне) значення параметра  $x_n$ .

Величина  $r_n(t)$  може приймати будь-які значення, але всі вони такі, що при виконанні нерівності  $-1 < r_n(t) < 1$ , процес в системі протікає якно, а при значеннях  $r_n(t) \geq 1$  або  $r_n(t) \leq -1$  система дає збій по якості. Оскільки при будь-якому кінцевому  $t$  величини  $r_n(t)$  фізично обмежені як «зверху», так і «знизу», то безрозмірна величина  $r_n(t)$  має нижній  $r_{n, \text{min}}(t)$  і верхній порог  $r_{n, \text{max}}(t)$  значень  $r_n(t)$ , які є кінцевими. Причому завжди  $r_{n, \text{min}}(t) < r_{n, \text{max}}(t)$ . Тому моменти  $t_{1, n}$  та  $t_{2, n}$  відмови  $n$ -го параметру системи за якістю визначаються із розв'язку рівнянь

$$r_{n, \text{min}}(t_{1, n}) = -1 \text{ и } r_{n, \text{max}}(t_{2, n}) = 1,$$

а якість цього параметра за часом характеризується величиною

$$H_n = \min(t_{1, n}, t_{2, n})$$

Звідси якість всієї системи за контрольованими параметрами

$$H = \min \{H_n\}_{n=1}^N.$$

Існування верхнього і нижнього порогів параметра  $r_n$  вимагає, щоб дійсна функція щільності  $f_n(r)$  безрозмірного параметра мала вигляд

$$f_n(r) = (r - r_n) \delta(r_n + r) - r \delta(r - r_n),$$

де  $r_n$  – нижній поріг параметра  $r$ ;  $r_n + r_n$  – верхній поріг параметра  $r$ ;  $\Psi_n(r)$  – дійсна функція безрозмірного параметра.

Оскільки  $f_n(r) > 0$  для будь-яких  $r$ , що належать  $(r_n; r_n + r_n)$ , то  $\Psi_n(r) > 0$  для будь-яких  $r$ , що належать  $(r_n; r_n + r_n)$ . Істинну функцію  $\Psi_n(r)$  неможливо знайти, тому вона прийнята у вигляді степеневий залежності, що експериментально підтверджено великою

кількістю досліджень за різними параметрами. Отримана функція розподілу параметра якості  $g$  має вигляд

$$F(r) = \begin{cases} 0 & , \text{при } r \leq r_0; \\ \frac{(r_0 + r_n - r)^{\alpha+1} (r_0 + (1+\alpha)(r - r_0))}{r_0^{\alpha+1}} & , \text{при } r_0 \leq r \leq r_1; \\ 1 & , \text{при } r > r_0 + r_1; \end{cases}$$

де  $\alpha$  – параметр форми.

Математичне очікування і дисперсія випадкової величини  $R$

$$M(R) = r_0 + \frac{2r_1}{\alpha+3} \quad \text{и} \quad D(R) = \frac{2(\alpha+1)r_1^2}{(\alpha+3)^2(\alpha+4)}$$

Оцінки параметри моделі визначаються з розв'язку системи

$$\begin{cases} \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-2} C_{i+1}^2 r_{(i)} = \mu_{13}; \\ \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (i-1)(n-i)r_{(i)} = \mu_{23}; \\ \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-2} C_{i+1}^2 r_{(i)} = \mu_{33}; \end{cases}$$

де  $n$  – обсяг контрольної вибірки;  $C_{i+1}^2$  – число послідовь з обсягу вибірки  $n-i$  по 2;

$\mu_{13}$  – математичне очікування 1-ої порядкової статистики з обсягу вибірки  $n=3$ .

$$\text{Оцінки параметри: } r_0 = \frac{2(2\alpha+5)(2\alpha+3)\alpha+3 \left( \sum_{i=1}^{n-2} C_{i+1}^2 r_{(i)} - \sum_{i=1}^{n-2} C_{i+1}^2 r_{(i)} \right)}{3n(n-1)(n-2)(\alpha+1)(\alpha+2)},$$

$$r_1 = \frac{6 \sum_{i=1}^{n-2} C_{i+1}^2 r_{(i)}}{n(n-1)(n-2)} - \frac{2r_0(3\alpha^2+41\alpha+32)}{(3\alpha+7)(3\alpha+5)(3\alpha+4)},$$

де  $\alpha$  знаходиться із розв'язку кубного рівняння

$$\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (i-1)(n-i)r_{(i)} - \sum_{i=1}^{n-2} C_{i+1}^2 r_{(i)}}{\sum_{i=1}^{n-2} C_{i+1}^2 r_{(i)} - \sum_{i=1}^{n-2} C_{i+1}^2 r_{(i)}} = \frac{50\alpha^3 + 240\alpha^2 + 370\alpha + 180}{8\alpha^3 + 432\alpha^2 + 747\alpha + 420}$$

Розроблена часова модель якості з оцінками якості її контрольованих параметрів, дозволила запропонувати методику розрахунку ТС, яка гарантує якість виробів, що випускаються.

#### Висновки

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Якісне складання з'єднань з нагном визначається для запускування величиною контактного тиску, а при використанні термодії – температурою та її розподілом. За



запропонованою номограмою можна вибрати якнайкращий варіант технології залежно від характеристик з'єднань.

2. Інформаційне забезпечення технології дає змогу знизити рівень витрат теплової енергії: збирання по дієвому нагріву – до 35 % від нагріву під максимальний нагріт; селективне збирання по нагріву, близькому до мінімального – до 50 % і збирання з приготуванням деталей на мінімальний нагріт – до 60 %.

3. Локальний індукційний нагріт зони отвору деталі, що конструктивно є маточиною з диском або маточиною з диском і ободом, дозволяє заощадити теплову енергію до 25 % від повного нагріву деталі. Найбільш напружені в матеріалі деталі з диском і ободом виникають при кутах нахилу диску 4-8 градусів.

4. Запропоновані систематизація виробів та з'єднань з нагрітом деталей, типізація індукційних нагрівачів дозволили на загальній основі уніфікувати технології для процесів збирання і розбирання з використанням однотипного устаткування.

#### Список використаних джерел:

1. Арпентьев, Б. М. Типізація технологічних процесів збирання з термовозбудженням на основі технологічного класифікатора з'єднань // Б. М. Арпентьев, А. Г. Зібер / Стандарти в якості. – 1988. – №11. – С. 33-34.
2. Діка, А. К. Расчет теплового режима составных соединений, собираемых с нагревом / А. К. Діка, Б. М. Арпентьев / Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1989. – № 2. – С. 115-120.
3. Діка, А. К. Немелкая модель теплового режима сборки и разборки соединений с нагревом / А. К. Діка, Н. К. Резниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Львів: ІТУ «ХПІ», 2005. – № 23. – С. 89-95.
4. Діка, А. К. Оптимизация индукционного нагрева изделий в механосборочном производстве / А. К. Діка, Н. К. Резниченко // Решения и инструменты в технологических системах: Материалы науч.-тех. сб. – Харьков: ИТУ «ХПІ», – 2007. – № 72. – С. 136-143.

#### References

1. Arpentev, B & Ziber, A. 1988. "Tipizatsiya tekhnologicheskikh protsessov sborki s termovozbuzhdeniem na osnovie tekhnologicheskogo klassifikatora soyedineniy". Standarty (kachestvo), no. 11, pp. 33-34.
2. Dika, A & Arpentev, B. 1989. "Raschet teplovogo rezhima sostavnykh soyedineniy, sobirayemykh s nagrevom". Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye, no. 2, pp. 115-120.
3. Dika, A & Reznichenko, N. 2005. "Nemelnaya model teplovogo rezhima sborki i razborki soyedineniy s nagrevom". Visnyk Natsionalnoho tekhnicheskoho universytetu "KHP", no. 23, pp. 89-95.
4. Dika, A & Reznichenko, N. 2007. "Optimizatsiya induktsionnogo nagreva izdeliy v mekhanosbortochnom proizvodstve". Resheniya i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh, no. 72, pp. 136-143.

Стаття надійшла до редакції 11 квітня 2017 р.