

УДК 621.791.77.004.18

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

©Резніченко М. К.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Резніченко Микола Кирилович: ORCID: 0000-0002-6989-0270; rezlynik@gmail.com; доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального 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 натягу і зовнішнього діаметра деталі, що охоплює, 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 охоплює і контактні тиски в поєднанні.

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

Резніченко Н. К. «Ресурсосберегающие технологии при индукционно - тепловой сборке неподвижных соединений».

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 натяга и наружного диаметра охватываемой детали, построена номограмма, учитывающая температуру и контактное давление.

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

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

Reznichenko 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 новітнє 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 натягом, 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 енергоносія, відсутності забруднення середовища, можливої високої концентрації потужності, гнучкості управління, точності регулювання температури та інших факторів.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Якість 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. (1956 р.), Андрєєвим 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., Зенкін 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 навколишнє середовище, переходу теплоти в охоплюючу деталь, раціональний просторовий розподіл теплової енергії проводили Корсаков В. С. (1961 р.), Андрєєв Г. Я. (1962 р.), Лактіонов Н. М. (1979 р.), Арпентьев Б. М.

Технологія машинобудування

(1987 р.), Куцин 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 напруги в деталях, і 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 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.

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 %.

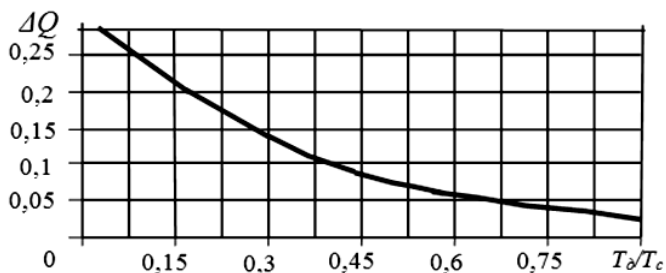


Рис. 1 – Зміни величини економії теплової енергії ΔQ при різних відношеннях температур нагріву диска T_d і маточини T_c

На рис. 1 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 $0,3$.

Враховуючи, що складання з термодією підвищує міцність з'єднання з натягом у деталей, що мають маточину,

необхідно завжди зменшувати її масу, що забезпечить зниження витрати теплової енергії.

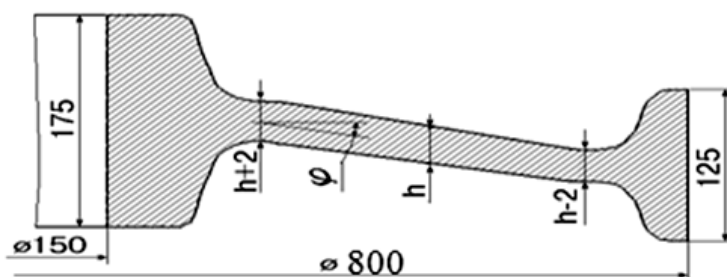
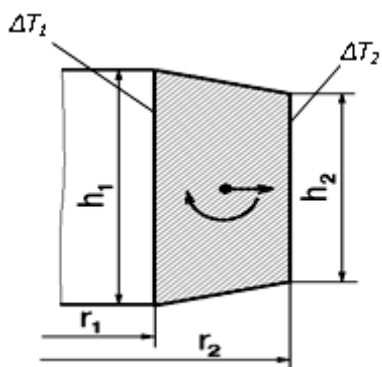


Рис. 2 – Схема конструкції центра колеса тепловоза ТГМ – 40

На прикладі конструкції центра колеса тепловоза ТГМ-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 кілець (рис. 3) і оболонок

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

**Рис. 3** – Елемент «кільце»

Система рівнянь, які описують пружну деформацію твердого тіла, включає рівняння рівноваги

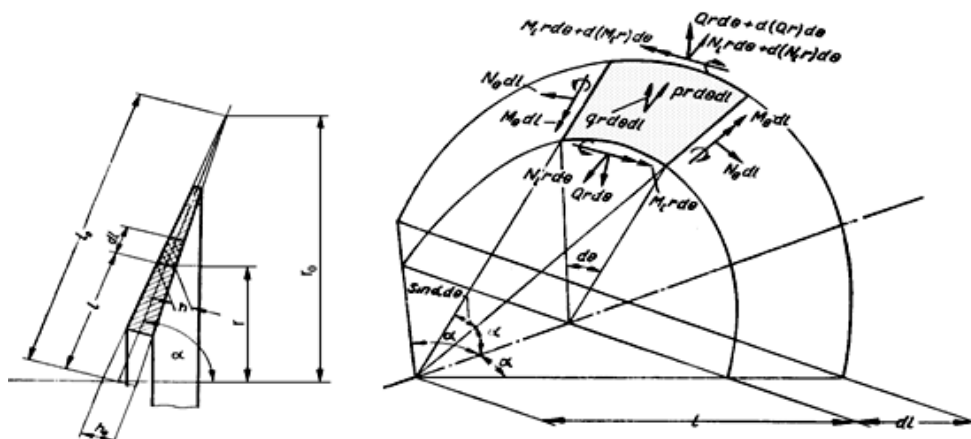
$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \sigma_{ij} + X_j = 0; \quad j = \overline{1,3};$$

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. 4** – 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 $X_{iv} = \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} l_j$; $i = \overline{1,3}$ або в переміщеннях $u_i = g_i$; $i = \overline{1,3}$; де X_{iv} – компоненти поверхневих напружень; g_i – переміщень на поверхні; l_i – косинуси кутів між координатними осями і нормаллю до площадки.

Тоді:

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

$$\Delta T = T - T_0$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Було встановлено, що максимальні еквівалентні напруги σ_e , при тих же енерговитратах на локальний нагрів створюються в залежності від h при нахилі диску від 4° до 8° (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 індуктора.

Розглянувши найбільш поширені посадки з відхиленнями Н7, Н8 при п6, р6, г6, s6, n7, x7, z7 і Н7, Р7, R7, S7, N8, U8 при h6, h7, h8 з'єднань із сталі типу „втулка і суцільний вал”,

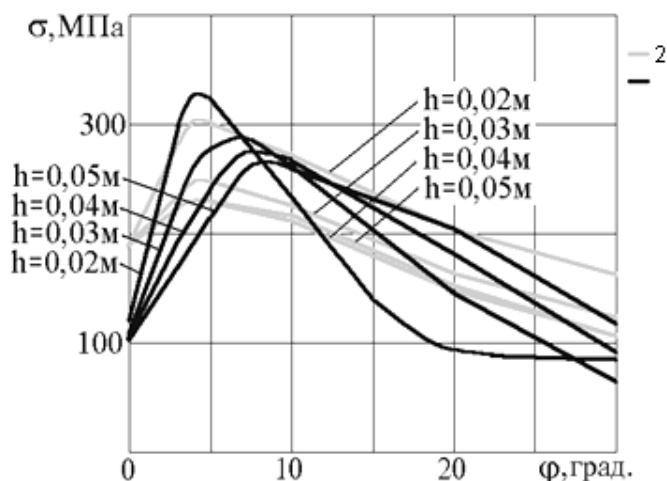


Рис. 5 – Максимальні напруги в диску колісного центра при нагріванні маточини 1 – зона біля маточини; 2 – зона біля ободу

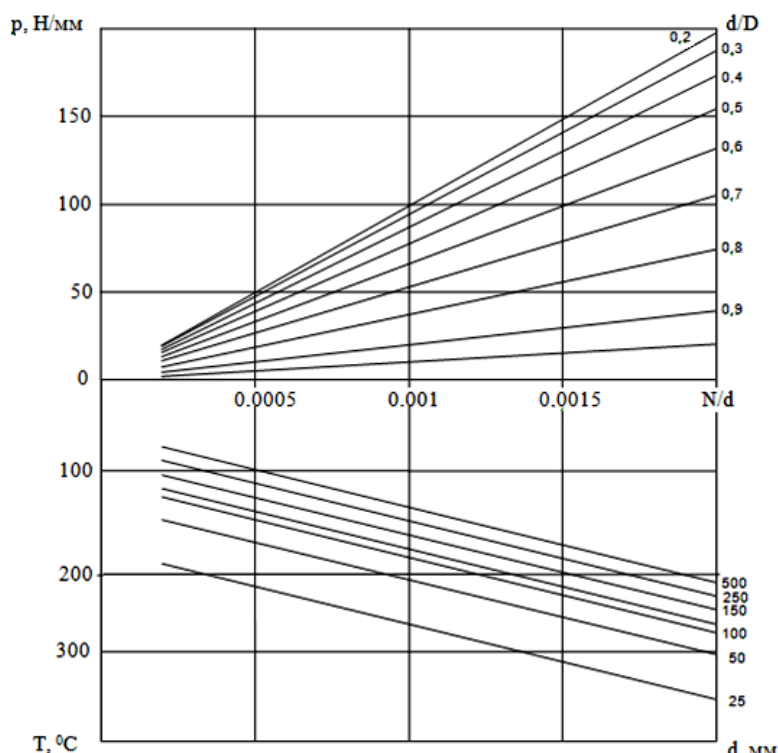


Рис. 6 – Номограма для визначення сфер застосування технології запресовкою і технології з нагрівом: d – посадочний діаметр; D – зовнішній діаметр втулки; p – питомий тиск

або відсутність силової дії. Розроблено 4 схеми уніфікованих ТП складання і 3 – розбирання, що охоплюють роботу з дво- і багатоелементними складальними одиницями.

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

побудовано номограму, яка дозволяє визначити галузі кращого застосування технологій складання запресовкою чи з використанням нагріву (рис. 6). Прийняті обмеження для запресовки – величина контактної тиску в посадці, що викликає задири поверхонь, в технології складання з нагрівом – це температура в $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, як гранична, як така, що не викликає змін фізико-механічних властивостей матеріалу.

Понизити енергоємність ТП можливо за рахунок збільшення інформаційного ресурсу. При ТП 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 (N_{\max}), може скласти до 35 %, а при забезпеченні натягу близького до мінімального (N_{\min}), внаслідок групування деталей – до 50 %, при приточуванні деталей на N_{\min} – до 60 %.

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

Технологія машинобудування

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

$$\begin{aligned} \tau(O_1 \cup O_2 \cup \dots \cup O_n) &= \tau(O_1) + \tau(O_2) + \dots + \tau(O_n) - \\ &- \{\tau(O_1 O_2) + \tau(O_1 O_3) + \dots + \tau(O_{n-1} O_n)\} + \{\tau(O_1 O_2 O_3) + \tau(O_1 O_2 O_4) + \dots \\ &+ \tau(O_{n-2} O_{n-1} O_n)\} - \dots + (-1)_{n-1} \tau(O_1 O_2 \dots O_n), \end{aligned}$$

Тут τ – 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 τ безрозмірного параметра $r_m(\tau)$

$$r_m(\tau) = (x_m(\tau) - x_m^* - x_{m.\text{опт}}),$$

де x_m^* – допустима верхня межа m -ого параметра; $x_{m.\text{опт}}$ – оптимальне (номінальне) значення параметра x_m .

Величина $r_m(\tau)$ може приймати будь-які значення, але всі вони такі, що при виконанні нерівності $-1 < r_m(\tau) < 1$, процес в системі протікає якісно, а при значеннях $r_m(\tau) \geq 1$ або $r_m(\tau) \leq -1$ система дає збої по якості. Оскільки при будь-якому кінцевому τ величини $r_m(\tau)$ фізично обмежені як «зверху», так і «знизу», то безрозмірна величина $r_m(\tau)$ має нижній $r_{m.o}(\tau)$ і верхній порог $r_{m.в}(\tau)$ значень $r_m(\tau)$, які є кінцевими. Причому завжди $r_{m.o}(\tau) < r_{m.в}(\tau)$. Тому моменти $\tau_{1.m}$ та $\tau_{2.m}$ відмови m -го параметру системи за якістю визначається із розв'язку рівнянь

$$r_{m.o}(\tau_{1.m}) = -1 \text{ и } r_{m.в}(\tau_{2.m}) = 1,$$

а якість цього параметра за часом характеризується величиною

$$H_m = \min(\tau_{1.m}, \tau_{2.m}).$$

Звідси якість всієї системи за контрольованими параметрами

$$H = \min_{1 \leq m \leq N} \{H_m\}.$$

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

$$f_u(r) = (r - r_o)(r_o + r_k - r)\Psi_u(r),$$

де r_o – нижній поріг параметра r ; $r_o + r_k$ – верхній поріг параметра r ; $\Psi_u(r)$ – дійсна функція безрозмірного параметра.

Оскільки $f_u(r) > 0$ для будь-яких r , що належать $(r_o; r_o + r_k)$, то $\Psi_u(r) > 0$ для будь-яких r , що належать $(r_o; r_o + r_k)$. Істинну функцію $\Psi_u(r)$ неможливо знайти, тому вона прийнята у вигляді степеневі залежності, що експериментально підтверджено великою

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

$$F(r) = \begin{cases} 0 & , \text{при } r \leq r_0; \\ 1 - \frac{(r_k + r_0 - r)^{\alpha+1} (r_k + (1+\alpha)(r-r_0))}{r_k^{2+\alpha}} & , \text{при } r_0 \leq r \leq r_0 + r_k; \\ 1 & , \text{при } r > r_0 + r_k; \end{cases}$$

де α – параметр форми.

Математичне очікування і дисперсія випадкової величини R

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

Оцінки параметрів моделі визначаються з розв'язку системи

$$\begin{cases} \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)} = \mu_{1;3}; \\ \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=2}^{n-1} (i-1)(n-i)r_{(i)} = \mu_{2;3}; \\ \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=3}^n C_{i-1}^2 r_{(i)} = \mu_{3;3}, \end{cases}$$

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

$\mu_{i;3}$ – математичне очікування i -ої порядкової статистики з обсягу виборки $n=3$.

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

$$\hat{r}_0 = \frac{6 \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)}}{n(n-1)(n-2)} - \frac{2 \hat{r}_k (13\alpha^2 + 41\alpha + 32)}{(3\alpha+7)(3\alpha+5)(3\alpha+4)},$$

де α знаходиться із розв'язку кубічного рівняння

$$\frac{\sum_{i=2}^{n-1} (i-1)(n-i)r_{(i)} - \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)}}{\sum_{i=3}^n C_{i-1}^2 r_{(i)} - \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)}} = \frac{50\alpha^3 + 240\alpha^2 + 370\alpha + 180}{81\alpha^3 + 432\alpha^2 + 747\alpha + 420}.$$

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 натягом визначається для запресування величиною контактного тиску, а при використанні термодії – температурою та її розподілом. За

Технологія машинобудування

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

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

3. Локальний індукційний нагрів 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. Найбільші напруги в матеріалі деталі з диском і ободом виникають при кутах нахилу диску 4-8 градусів.

4. Запропоновані систематизація виробів та з'єднання з натягом 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. Типизация технологических процессов сборки с термовоздействием на основе технологического классификатора соединений / Б. М. Арпентьев, А. Г. Зильбер // *Стандарты и качество*. – 1988. – № 11. – С. 33-34.
2. Дука А. К. Расчет теплового режима составных соединений, собираемых с нагревом / А. К. Дука, Б. М. Арпентьев // *Известия ВУЗов. Машиностроение*. – 1989. – № 2. – С. 115-120.
3. Дука А. К. Нелинейная модель теплового режима сборки и разборки соединений с натягом / А. К. Дука, Н. К. Резниченко // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 23. – С. 89-95.
4. Дука А. К. Оптимизация индукционного нагрева изделий в механосборочном производстве // А. К. Дука, Н. К. Резниченко // *Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб.* – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2007. – № 72. – С. 136-143.

References

1. Arpentyev, B & Zilber, A 1988, 'Tipizatsiya tekhnologicheskikh protsessov sborki s termovozdeystviem na osnove tekhnologicheskogo klassifikatora soyedineniy', *Standarty i kachestvo*, no. 11, pp. 33-34.
2. Duka, A & Arpentyev, B 1989, 'Raschet teplovogo rezhima sostavnykh soyedineniy, sobiraemykh s nagrevom', *Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye*, no. 2, pp. 115-120.
3. Duka, A & Reznichenko, N 2005, 'Nelineynaya model teplovogo rezhima sborki i razborki soyedineniy s natyagom', *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*, no. 23, pp. 89-95.
4. Duka, A & Reznichenko, N 2007 'Optimizatsiya induktsionnogo nagreva izdeliy v mekhanosborochnom proizvodstve', *Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh*, no. 72, pp. 136-143.

Стаття надійшла до редакції 11 квітня 2017 р.