

УДК: 621.88.084.1

А.С. ЗЕНКІН, А.В. ПРИЩЕП, С.М. ЗЕНКІНА, О.В. МАЩЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДАННЯ З'ЄДНАНЬ З НАТЯГОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

Стаття присвячена питанню дослідження шляхів забезпечення якості, зниження трудомісткості і вартості з'єднань з натягом, збірка яких здійснюється з використанням низьких температур на автоматизованому обладнанні. Отримано закономірності освіти сукупності структурних зв'язків, що діють в процесі складання з'єднань з натягом з використанням таких методів, і на їх основі розроблено загальну методику оцінки кількісної залежності між необхідною якістю будь-якого з'єднання, розрахунковими значеннями режимів складального процесу і необхідною для з'єднання точністю відносного положення поверхонь, що сполучаються.

Ключові слова: збірка, натяг, з'єднання, напруга, надійність, низькі температури.

A.S. ZENKIN, A.V. PRISHEP, S.M. ZENKINA, O.V. MASHCHENKO

Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine

METHOD OF CALCULATION TECHNICAL PARAMETERS OF PREPARATION CONNECTED TO THE TENSION WITH LOW TEMPERATURES

Abstract - Article is devoted to problem of searching for ways providing quality, decrease of labour intensity, and value of joints with tension that are assembled using low temperatures with the help of automatic equipment. Objective laws of formation of structural connections set functioning in the a process of assembling of joints with tension using thermal methods were obtained. The objective laws were used in development of general, method of evaluation of quantitative dependence between required quality of any jointed values of regimes of assembling process and accuracy of relative position of surfaces integration needed for connection.

Key words: assembly, tension, joint, tension, reliable, low temperatures.

Основний розділ

Посадка з натягом широко застосовується в машинобудуванні для отримання нерухомих з'єднань, які не розбираються чи які рідко розбираються. Нерухомі з'єднання, які не розбираються, характеризуються точністю і міцністю. З'єднання з натягом відрізняються від інших з'єднань нерухомих з'єднань високої технологічною і надійністю і отримують всі більш розповсюджені в конструкціях машин і апаратів, замінюючи конічні, шпоночні і інші з'єднання.

Прикладом таких з'єднань є колісні пари для залізної – дорожніх вагонів, втулки в станках машин, біметалічні підшипники і ін.

При використанні звичайної технології складання з гарантованим натягом в більшості випадків отримують з'єднання за допомогою пресу або з нагрівом деталей (зовнішня деталь – охоплює, а внутрішня – охоплювана). Однак ці способи складання мають істотні недоліки. Так, посадки, яка здійснюється запре совкою, у ряді випадків не забезпечують достатньої міцності сполучення, а при зборці тонкостінних деталей часто виникає недопустимі деформації, тріщини і навіть полумки.

Особливо великі труднощі виникають при запресуванні довгих тонкостінних деталей у важкі великогабаритні корпуси і інші частини машин, де якісне складання за допомогою пресу зробити майже неможливо. Складання тонкостінних деталей з гарантованим натягом методом вібраційно-імпульсного впливу через недостатню жорсткість цих деталей досить обмежена. Застосування гвинтових пресів, ручних молотків, вантажів, підвішених за допомогою підйомного крану, для складання з'єднань є недосконалим і малопродуктивним процесом, який потребує великих затрат фізичного труда і не забезпечують необхідної міцності і довговічності з'єднань.

Міцність теплових посадок значно вище міцності пресових. Однак при теплових посадках нерідко виникають надмірна напруга і деформації в складальних деталях, не гарантується зберігання структури і механічних властивостей матеріалів, потребують значних затрат часу на нагрів охоплюючи деталей, яких може визвати появлення окалини, що значно ускладнює пресування, а іноді робить її взагалі неможливою. При зборці деталей з різним коефіцієнтом лінійного розширення, наприклад, бронзових втулок з великогабаритними сталевими деталями, виникають залишкові деформації, що приводить до ослаблення посадки.

Таким чином, звичайними методами здійснити якісне складання, яке забезпечить міцне і без деформаційне з'єднання тонкостінних деталей, практично неможливо.

Складання за допомогою охолодження охоплюваної деталі, у результаті якого вона стискається і може бути вільно встановлена на потрібне місце, дозволяє здійснювати всі стандартні пресовані посадки. Цей спосіб може застосовуватись при складанні тонкостінних деталей із відпаленої і загартованої сталі всіх марок, чугунку і кольорових металів, і при цьому не погіршується їх структура і якість. Одною із значних переваг посадок, які здійснюються за допомогою глибокого охолодження, є те, що деформація деталей значно зменшується і в ряді випадків відпадає необхідності їх наступної обробки. Це дає можливість виробляти кінцеву механічну обробку сполучених деталей до складання. Складання тонкостінних деталей за

допомогою охолодження охоплюваної деталі виконується значно швидше і з меншими затратами, ніж при використанні інших способів.

Складання способом охолодження в рідкому азоті – не дорога, безпечна операція, яка не вимагає громіздкого пня і великих зусиль робочого.

Застосування способу глибокого охолодження значно скорочує тривалість зборки, а також виключає обробку втулок після посадки. При з'єднанні, яке відбувається за допомогою холоду, не допускаються удари по охолодженій деталі, так як сталі багатьох марок і деякі сплави при низьких температурах стають крихкими.

Розрахунок міцності з'єднань з натягом, яке відбувається з охолодженням, відбувається по тим же формулам, які рекомендуються для розрахунку з'єднань, які відбуваються при звичайному запресуванні.

Коефіцієнти лінійного розширення при нагріві і коефіцієнти стискання при охолодженні для сталі, чугунку, бронзи і деяких інших сплавів приведені в табл. 1

Як видно з таблиці 1, коефіцієнти лінійного розширення при нагріві більші, ніж коефіцієнти стискання при охолодженні, що необхідно враховувати при визначенні температури охолодження деталей в процесі зборки із застосуванням холоду.

Розрахунки і досвід показують, що для здійснення стандартних пресових посадок в більшості випадків потрібні досить низькі від'ємні температури /від 213 до 123 К і нижче/.

Найбільш простим по влаштуванню і обслуговуванню є холодильні установки, які працюють на готових холодоносіях. Досвід показує, що використання установок економічно більш доцільно при умові централізованого виготовлення холодоносіїв на спеціалізованих заводах. При цьому створюються сприятливі умови для широкого впровадження нової технології зборки.

Таблиця 1

Коефіцієнти лінійного розширення /стискання/ при нагріві /охолодженні/ основних металів і сплавів

| Матеріал | $\alpha \cdot 10^{-6}$ | |
|--------------------------------|------------------------|-------------|
| | Нагрів | Охолодження |
| Сталь /1% С/ загартована | 12 | 9,5 |
| Сталь і фасоване сталеве лиття | 11 | 8,5 |
| Чавунне лиття | 10 | 8 |
| Кований чавун | 10 | 8 |
| Мідь | 16 | 14 |
| Бронза | 17 | 15 |
| Латунь | 18 | 16 |
| Алюмінієві сплави | 23 | 18 |
| Магнієві сплави | 26 | 21 |

При виконанні зборки з охолодженням в рідкому азоті необхідно мати на увазі наступне. Після занурення виробів рідкий азот починає кипіти внаслідок інтенсивного пароутворення. Особливо бурхливе кипіння азоту спостерігається в кінці процесу охолодження. Після охолодженнь виробів до температури, близької до температури кипіння азоту, інтенсивність пароутворення різко знижується. Ця обставина може бути використана для орієнтованого контролю кінцевої температури охолодження виробів. Тривалість охолодження деталей в азоті коливається від декількох хвилин до 20-30 хвилин у залежності від розмірів їх поверхні і повинна встановлюватися досвідченим шляхом.

Перед охолодженням деталі потрібно ретельно очищати від масла і стружки, на крайках сполучених деталей необхідно зняти задирки. Після охолодження охоплювану деталь необхідно відразу з'єднати із сполученою для уникнення нагріву першої.

У процесі охолодження потрібно контролювати кількість азоту і при необхідності доповнювати його для того, щоб рівень рідкості був вище охолоджених деталей на 50–100 мм. При роботі з рідким азотом і іншими холодоносіями потрібно суворе дотримання спеціальних правил безпеки.

Для зменшення термічних напруг загартованості виробу, особливо складної форми, не рекомендується відразу занурюватись в рідкий азот. Їх необхідно попередньо витримати деякий час в холодильних парах над дзеркалом рідкого азоту в спеціальній сітці-контейнері.

Рекомендується також застосовувати холодильні камери, в яких передбачена можливість використання парів азоту для попереднього охолодження деталей. Така холодильна камера складається із відділення для попереднього охолодження деталей в парах азоту і відділення для кінцевого охолодження в рідкому азоті, що дозволяє отримати значну його економію до 30%.

Вибір варіанта технологічного процесу з термічним впливом у значній мірі пов'язаний з конструкцією з'єднання і факторами виробничого характеру (об'єм випуску, серійність, можливість встановлення обладнання для нагріву чи охолодження, умови зберігання холодоносія і т. д.). Технолог спочатку повинен визначити вид термічного впливу (нагрів, охолодження чи їх комбінація). Тут зазвичай визначальними виступають і натяг з'єднання, і конструкція. З'єднання з великими по розмірам і складними по конфігурації деталями при встановленні в них втулок, гільз, пальців потрібно збирати з охолодженням. Енерговитрати і можливі температурні деформації роблять зборку з нагрівом в цьому випадку неефективною.

Нагрів може бути рекомендований для зборки коліс, маховиків, тонких втулок з валами діаметром більше 100 мм, великих підшипників, при насадці бандажів і обичайок на центри коліс.

Натяг з'єднання і термічний складальний зазор визначають температуру, яка повинна мати нагріта (та що охоплює) чи охолоджена (охоплювана) деталь для здійснення зборки. Однак необхідна і компенсація збільшення діаметра охолодженої чи зменшення діаметра нагрітої деталі за час подачі на складальну позицію. Тоді температура термічного впливу

$$T = \frac{N_{max} + i + \Delta d_{ні}}{\beta d} \pm T_0,$$

Де N_{max} – максимальний натяг, мм; i – термічний складальний зазор, мм; $\Delta d_{ні}$ – компенсаційне розширення (звуження) посадкової поверхні, мм; β – коефіцієнт лінійного розширення (звуження) матеріалу, $1/^\circ\text{C}$; d – номінальний діаметр з'єднання; T_0 – температура навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$, її приймають зі знаком «плюс» при розрахунку нагріву і зі знаком «мінус» при охолодженні.

Таблиця 2

Коефіцієнт лінійного розширення (звуження) β матеріалів при нагріванні (охолодженні)

| Матеріал | $\beta * 10^6, 1/^\circ\text{C}$ | |
|---------------------|----------------------------------|-------------|
| | Нагрів | Охолодження |
| Сталь загартована | 12 | -9,5 |
| Сталь незагартована | 11 | -8,5 |
| Чавун | 10 | -8 |
| Мідь | 16 | -14 |
| Бронза | 17 | -15 |
| Латунь | 18 | -16 |
| Алюмінієві сплави | 23 | -18 |
| Магнітні сплави | 26 | -21 |

Температура T повинна бути менше T_{max} як максимально допустимою або доступною температурою. У табл. 2 представлені коефіцієнти лінійного розширення (звуження) матеріалів сполучених деталей.

Технологічний процес зборки з охолодженням з'єднань з гарантованим натягом є процесом з участю великої кількості факторів. Схематично його можна зобразити у вигляді схеми, представленої на рисунку 1.

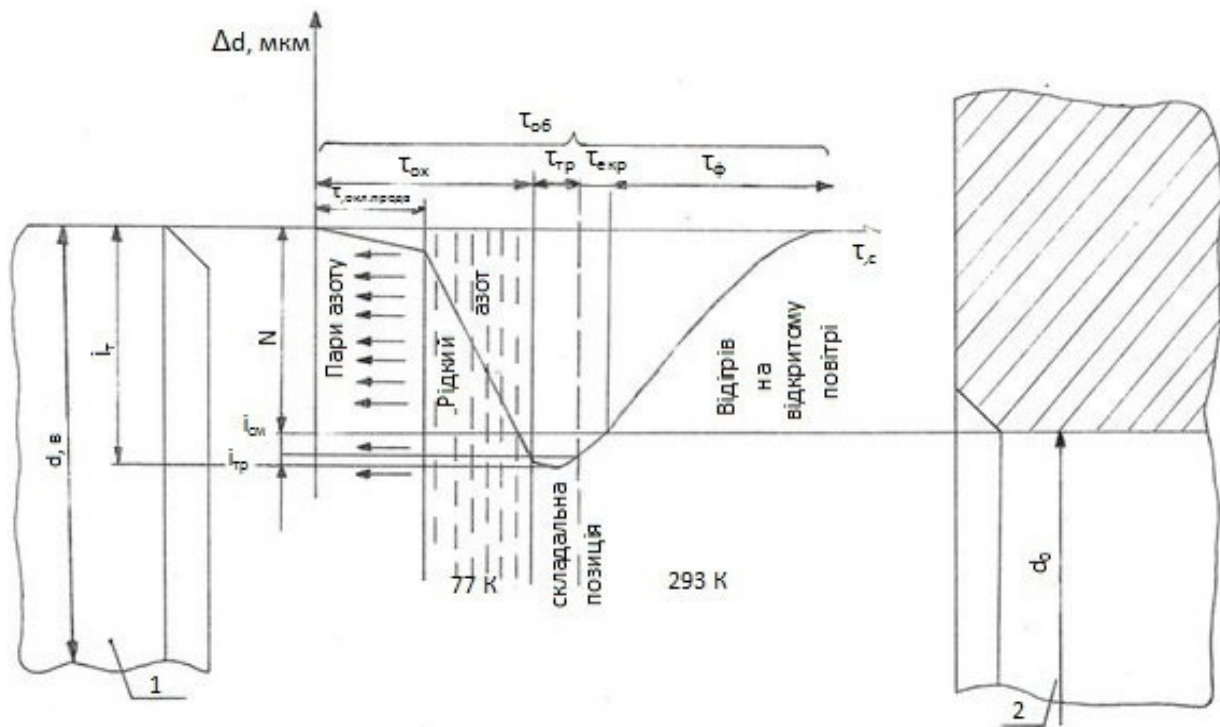


Рис. 1. Технологічні параметри автоматичної зборки з використанням низьких температур

Призначена для охолодження деталь 1 проходить стадію попереднього охолодження ($T_{охл}$) в

парах холодоагенту (на схемі і в подальшому в якості холодоагенту прийнятий рідкий азот) і потім безпосередньо в середовищі холодоагенту охолоджується до температури його насичення (-195,8 °C). У цей період ($t_{охл}$) відбувається скорочення посадкового діаметра на величину i_T , визначену типом холодоагенту

$$i_T = (T_n - T_c) \alpha_{д1} * d, \tag{1}$$

де T_n і T_c – температури деталі в початковий момент зборки і холодоагенту;
 $\alpha_{д1}$ – коефіцієнт лінійного розширення деталі, яка охолоджується, град – 1;
 d – діаметр сполучення, М.

У свою чергу згідно схемі (рис. 1)

$$i_T = i_{ТФ} - i_{СМ} + N \tag{2}$$

Тут $i_{ТФ}$ – зміна величини посадкового діаметра охоплюваної деталі в процесі її транспортування на складальну позицію зі зборки, М;

$i_{СМ}$ – зазор, необхідний для вільного без заклинювання суміщення деталей, М;

N – натяг у з'єднанні.

Час необхідний для транспортування та суміщення деталей позначається на схемі $t_{ТФ}$.

Величина зазору $i_{СМ}$ залежить від кута перекосу деталей в початковий момент збірки, коефіцієнта тертя в зоні їх контакту, геометричних розмірів приєднаної деталі, зусилля та обраної схеми складання.

Як видно зі схеми (рис. 1), при обраному холодоагенті і заданому натязі в з'єднанні якісне сполучення деталей забезпечується співвідношенням $i_{ТФ} \ll i_{СМ}$. Чим менше $i_{ТФ}$, а відповідної $t_{ТФ}$, тим більша величина $i_{СМ}$ нижче вимоги до точності складальних механізмів.

Після сполучення збираючих з охолодженням деталей в з'єднанні спостерігається наявність зазору $i_{эф}$, величина якого $\leq i_{СМ}$.

Процес скріплення суміщених деталей, що забезпечує їх відносну нерухомість, складається з двох етапів: скорочення зазору $i_{эф}$ до нуля ($t_{эф}$), яке дозволяє видаляти зібране з'єднання зі складальної позиції, і формування натягу $T_{Ф}$ - найбільш відповідальний момент забезпечення міцності з'єднання.

Представлена технологічна схема відображає параметри реалізації процесу складання. Однак, на якість виробів, що збираються не менш істотний вплив роблять параметри деталей, які надходять на складання та розрахункові параметри з'єднання.

Всі параметри збірки умовно розділені на чотири групи залежно від їх впливу на технологічний процес:

1. Характеристики деталей, що збираються.
2. Розрахункові параметри з'єднань.
3. Параметри реалізації.
4. Параметри реалізованого з'єднання.

У таблиці 3 представлена класифікація технологічних параметрів процесу автоматичної зборки з охолодженням.

Таблиця 3

Класифікація технологічних параметрів автоматичної збірки з охолодженням

| Параметри деталей /початкові дані/ | Розрахункові параметри з'єднання | Параметри реалізації Лінійні: часові | Параметри реалізованого з'єднання |
|---|----------------------------------|--|------------------------------------|
| Геометричні $d; d_1; \sigma; R_d; D; L;$ | 2.1. $N_{расч.}$ | 3.1. $t_T t_{охл}$ | 4.1. $N_{факт.}$ |
| $R_{д2}; \sigma_1; \sigma_2$ | 2.2. P_p чи $M_{кр}$ | 3.2. $t_{эф} t_{ТФ}$ | 4.2. $P_{факт}$ або $M_{кр}/факт/$ |
| 1.2. Фізико-механічні | 2.3. $T_{охл.}$ | 3.3. $t_{СМ} t_{эф}$ | |
| $E_1; M_1; C_{p1}; \alpha_{д1}; F_1; A_1$ | 2.4. М | 3.4. $N_{шт} t_{Ф}$ | |
| $E_2; M_2; C_{p2}; \alpha_{д2}; F_2; A_2$ | 2.5. α | | |
| | 2.6. Р | | |

Аналізуючи класифікацію, ми спостерігаємо тісний взаємозв'язок лінійних і часових параметрів, що дозволяє використовувати в дослідженнях і розрахунках часові параметри реалізації.

Процес охолодження деталі в середовищі холодоагенту є нестационарним процесом конвективного теплообміну в середовищі великого обсягу. Кількість тепла, що віддається деталлю становить

$$dQ = CdT, \tag{3}$$

де $C = V\rho c$ – повна теплоємність деталі, Дж/кг*К;

V – об'єм, m^3 ;

ρ – щільність, $кг/m^3$;

c – питома теплоємність, Дж/кг*К.

За законом Ньютона можна написати

$$dQ = S\alpha(T_x - T_c)dt, \quad (4)$$

де S – площа поверхні деталей, m^2 ;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/м^2 \cdot K$;

Вирішуючи диференціальне рівняння виду

$$\frac{dT}{T_x - T_c} = \frac{S\alpha}{c} dt, \quad (5)$$

Можемо отримати рішення для тимчасового охолодження:

$$T_{ох} = \frac{d\alpha c}{4\alpha} (-\ln \Theta), \quad (6)$$

Процес нагріву деталі на відкритому повітрі при транспортуванні на складальну позицію так само є процесом конвективного теплообміну в середовищі великого обсягу. Середовищем в даному випадку є повітря, а умови теплообміну враховуються величиною α , яка в даному випадку буде відрізнятися від попередньої. Розрахунок $T_{ох}$ можна проводити за формулою 6.

Скріплення суміщених при складанні з охолодженням деталей відбувається в результаті збільшення лінійного розміру посадкового діаметра охоплюваної деталі в процесі її теплообміну з охоплюючою $T_{ох}$ при їх безпосередньому контактуванні. У початковий момент скріплення деталей величина зазору в з'єднанні становить $i_{ох}/2$ на сторону. Для зовнішнього (радіусу R) і внутрішнього (радіуса r) циліндрів зможуть бути записані два диференціальних рівняння наступного виду

$$c_1 m_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{2S\alpha_c}{i_{ох}} (T_1 - T_2), \quad (7)$$

$$c_2 m_2 \frac{dT_2}{dt} = -\frac{2S\alpha_c}{i_{ох}} (T_2 - T_1), \quad (8)$$

Тут m_1, m_2 – маси охоплюваної і охоплюючої деталей відповідно, кг;

T_1, T_2 – їх температура, К;

α_c – теплопровідність середовища, яке заповнює зазор $Вт/м \cdot K$.

Вирішуючи отриману систему рівнянь з урахуванням, що в момент $\tau = \tau_{ох}$ зазор $i_{ох}$ обертається в нуль, отримуємо

$$T_{ох} = \frac{i_{ох}}{2S\alpha_c \left(\frac{1}{c_1 m_1} + \frac{1}{c_2 m_2} \right)} \left[1 + \frac{1-\theta}{\theta} \ln(1-\theta) \right], \quad (9)$$

де $\theta = \frac{i_{ох}}{2\Delta T_0} = \frac{c_2 m_2 + c_1 m_1}{c_1 m_1 c_{12} r_{01} + c_2 m_2 c_{12} r_{02}}$

Тут ΔT_0 – різниця температур деталей в початковий момент скріплення, К;

r_{01}, r_{02} – радіуси деталей в точці сполучення при початковій температурі, м.

Після того як зазор між деталями скоротився до нуля і сталося початкове скріплення деталей, починається процес формування натягу, тобто процес впровадження однієї деталі в іншу, що супроводжується деформаціями їх контактних шарів.

Процес формування натягу слід розглядати як процес теплообміну між деталями через поверхню контакту, що має площу S і термічний опір R_T . Температури деталей в момент часу T_1, T_2 . Конічна температура T_θ обох деталей в момент закінчення формування натягу τ_θ за умови нехтування теплообміном з навколишнім середовищем визначника з рівності $c_1 m_1 (T_\theta - T_{01}) = c_2 m_2 (T_{02} - T_\theta)$;

$$T_\theta = \frac{c_1 m_1 T_{01} + c_2 m_2 T_{02}}{c_1 m_1 + c_2 m_2} \quad (10)$$

Потік тепла через межу розділу задається рівнянням

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{T}{R_T} S (T_2 - T_1) \quad (11)$$

Це означає, що потік тепла лімітований контактним термічним опором. Тоді приріст тепла в першому і другому циліндрах відповідно рівні

$$c_1 m_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{T}{R_T} (T_2 - T_1) \quad (12)$$

$$c_2 m_2 \frac{dT_2}{dt} = -\frac{T}{R_T} (T_2 - T_1) \quad (13)$$

Інтегруючи рівняння із заданими початковими умовами, отримуємо для рівності температур ΔT вираження

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-\frac{T}{R_T} \left(\frac{1}{c_1 m_1} + \frac{1}{c_2 m_2} \right) t} \quad (14)$$

Отримане рівняння визначає закон вирівнювання температур суміщених деталей в процесі формування натягу. Логарифмуючи його, отримуємо остаточну формулу

$$T_\theta = \frac{R_T}{S} * \frac{\ln \left(\frac{\Delta T_0 (1-\theta)}{\Delta T_\theta} \right)}{\frac{1}{c_1 m_1} + \frac{1}{c_2 m_2}} \quad (15)$$

Приведена методика розрахунку дозволяє проводити розрахунки основних технологічних

параметрів автоматичної зборки з охолодженням з'єднань з гарантованим натягом.

Висновки

1. Технологічна операція зборки і машинна допоміжна операція транспортування, які проводяться з нагрітою чи охолодженою деталлю, повинні виконуватись тільки з використанням механізмів. Це дозволить наряду з покращенням умов праці за рахунок швидких переміщень максимально скоротити потреби енергії внаслідок охолодження нагрітої чи нагрівання охолодженої деталі, а також виконати приєднання одної деталі до іншої швидко і точно.

2. Збірка відбувається з термічним зазором, розмір якого постійно зменшується, так як деталі змінюють свою температуру. При зменшенні складального зазору нижче допустимого значення зборка або зовсім не здійснюється, або буде відбуватися з пошкодженням посадкових поверхонь, або деталі з'єднуються до того, як вони займуть необхідне відносно один одного положення.

3. Час, необхідний на операцію термічного впливу і на перехід кріплення зібраного виробу, часто більший часу машинних операцій і переходів разом узятих. Його можна скоротити, вибравши раціональні конструкції нагрівальних і охолоджуючих приладів, використовуючи декілька нагрівників одночасно, а також використавши примусове охолодження (або нагрів) зібраного з'єднання.

4. Необхідними умовами примусового охолодження є: рідина, яка використовується для охолодження вузла, не повинна викликати корродування посадкових і інших важливих поверхонь; у процесі охолодження не повинні змінюватись структура і фізико-механічні властивості матеріалу; при охолодженні не повинно виникати небезпечних пошкоджень елементів нагрітої деталі за рахунок великого перепаду температур.

Література

1. Зенкин А. С. Сборка неподвижных соединений термическими методами. / А. С. Зенкин, Б. М. Арпентьев. – М. : Машиностроение, 1987. – 128 с.
2. Арпентьев Б. М. Механизация и автоматизация сборочных работ на машиностроительных предприятиях / Б. М. Арпентьев, А. С. Зенкин, А. Н. Куцын. – К. : Техника, 1994. – 232 с.
3. Зенкин А. С. Выбор оптимальной технологии сборки соединений с натягом при тепловых методах воздействия. / А. С. Зенкин, М. В. Шпара, В. П. Куценко, Ю. В. Остапук // Материалы Международной научной молодежной школы «Системы и средства искусственного интеллекта ССИИ – 2013», 23–27 сентября 2013. Казивели, АР Крым, Украина.
4. Оборський І. Л. Особливості створення верстатів для складання з'єднань з термодією / І. Л. Оборський, Ю. В. Остапук // Технологія і техніка друкарства. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – № 3 (35). – С. 36–42.

Рецензія/Peer review : 17.3.2016 р.

Надрукована/Printed : 19.4.2016 р.
Рецензент : д.т.н., проф., Хімичева Г. І.