

III
PROBLEMY PROJEKTOWANIA
I MONTAŻU POŁĄCZEŃ

Mariusz KŁONICA
Józef KUCZMASZEWSKI
Politechnika Lubelska
Lublin

BADANIA PORÓWNAWCZE WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH PO OCZYSZCZANIU MECHANICZNYM I OZONOWANIU

COMPARATIVE RESEARCHES OF SHEARING STRENGTH OF SINGLE-LAP ADHESIVE BONDED JOINTS AFTER MECHANICAL CLEANING AND OZONIZATION

WSTĘP

Rozwój klejenia konstrukcyjnego znacznie przyspieszył kilkadziesiąt lat temu, wraz z opracowaniem tzw. klejów wzmocnionych lub klejów konstrukcyjnych, choć oczywiście klejenie jest znane od wieków i jest uważane za jedną z najstarszych technik łączenia. Ze względu na ciągły rozwój inżynierii materiałowej oraz inżynierii powierzchni [1] zagadnienie klejenia konstrukcyjnego jest nadal aktualne i stawiane ciągle przed nowymi problemami [9, 10, 12-14]. Połączenia klejowe są aktualnie bardzo często stosowane w budowie maszyn, przede wszystkim jako połączenia nierozłączne, choć znane są także połączenia klejowe, zwłaszcza w elektronice, o podwyższonej elastyczności, które mogą być traktowane jako rozłączne. Połączenia adhezyjne wykorzystuje się ze względu na możliwość łączenia materiałów o różnych właściwościach fizycznych i chemicznych, możliwość jednoczesnego łączenia i uszczelniania konstrukcji, dobrych właściwości tłumiących kleju, możliwości łączenia elementów o bardzo małych i bardzo dużych rozmiarach a także zróżnicowanych cechach geometrycznych.

Bardzo ważny i aktualny jest aspekt ochrony środowiska w przygotowaniu materiałów konstrukcyjnych dla technologii gdzie dominujące znaczenie odgrywa zjawisko adhezji. Obecnie stosowane w przemyśle metody przygotowania warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych dla „technologii adhezyjnych” wykorzystują w dużej mierze kąpiele o odczynie kwaśnym lub zasadowym, co negatywnie wpływa na stan środowiska naturalnego [15]. Olbrzymi problem stanowią związki chemiczne zużyte podczas procesu klejenia oraz sposób ich utylizacji. Nowoczesna produkcja wymaga stosowania innowacyjnych rozwiązań w całym procesie powstawania produktu począwszy od projektowania a skończywszy na technologii wykonania ze szczególnym uwzględnieniem ochrony środowiska.

Stosunkowo niewiele publikacji poświęcono zagadnieniom wytrzymałości zmęczeniowej oraz wytrzymałości długotrwałej konstrukcyjnych połączeń klejowych [3, 4]. Z przeprowadzonych badań [7, 8] wynika, że modyfikacja warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych w atmosferze ozonu [6] wpływa na wzrost składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej [2], co może mieć znaczenie w konstitowaniu wytrzymałość długotrwałej połączeń klejowych.

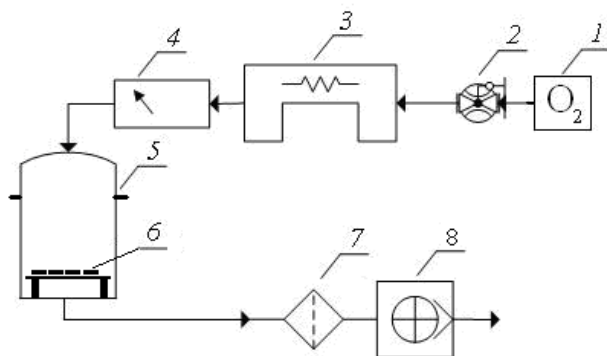
Celem prowadzonych badań jest porównanie wytrzymałości statycznej zakładkowych połączeń klejowych, wykonanych z jednego materiału, bez ozonowania i po ozonowaniu. Wiemy z relacjonowanych w [7, 8] naszych badań, że ozonowanie zwiększa wartość swobodnej energii powierzchniowej, nie jest to jednak warunek wystarczający do stwierdzenia, że spowoduje to wzrost wytrzymałości. Zależy to również od tego jak „wysokoenergetyczne” tlenki na powierzchni po ozonowaniu są silnie związane z podłożem.

STANOWISKO BADAWCZE

Do pomiarów kąta zwilżania na badanej powierzchni stopu aluminium oraz do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej użyto goniometru PGX wraz z oprogramowaniem. Zastosowane ciecze do pomiarów kąta zwilżania były наносzone na badaną powierzchnię w sposób automatyczny, w postaci kropli

o stałej objętości 4 μl , przez mechanizm goniometru. Pomiary odbywały się na płycie pomiarowej po uprzednim sprawdzeniu poziomu za pomocą poziomicy optycznej, w temperaturze otoczenia wynoszącej (20-22) $^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej (35 – 42)%.

Do pomiaru chropowatości zastosowano profilografometr firmy Taylor Hobson Surtronic3+.



Rys. 1 . Schemat stanowiska do ozonowania: 1 – koncentrator tlenu, 2 – przepływomierz z regulacją, 3 – generator ozonu, 4 – miernik stężenia ozonu, 5 – komora reakcyjna, 6 – próbki poddawane modyfikacji warstwy wierzchniej, 7 – destruktor ozonu, 8 – pompa ssąca

Na rysunku 1 schematycznie przedstawiono stanowisko laboratoryjne [11] do syntezy ozonu i modyfikacji warstwy wierzchniej badanych próbek. Badane próbki umieszczone były w szklanej komorze reakcyjnej (5).

Przepływ ozonu podczas ozonowania próbek wynosił 0,90 dm^3/min . Do pomiaru stężenia ozonu użyto miernika ozonu Ozone ANALYZER BMT 964.

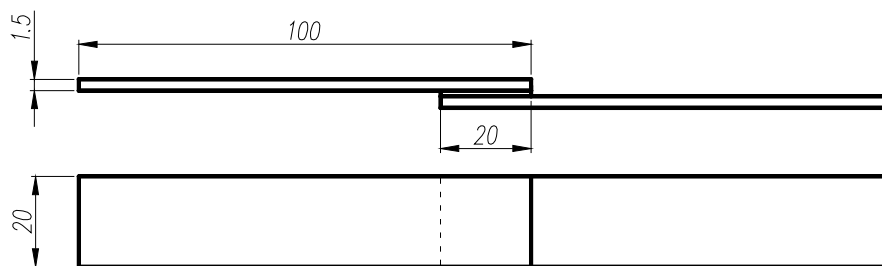
Badania wytrzymałościowe na ścinanie jednozakładkowych połączeń klejowych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z 100. Siła wstępna obciążająca badane połączenia klejowe wynosiła 400 N, prędkość jej ustawienia 40 mm/min, natomiast prędkość odkształcenia podczas próby niszczącej wynosiła 5 mm/min.

METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań były próbki wykonane jako jednozakładkowe połączenie klejowe blach ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6). Wymiary geometryczne próbek oraz połączenia klejowego wynosiły: długość łączonych elementów $l=100$ mm, szerokość $b=20$ mm, grubość łączonych blach $g_b=1,5$ mm, grubość warstwy kleju $g_k=0,1$ mm oraz długość zakładki spoiny klejowej $l_z=20$ mm. Graniczną długość zakładki połączenia klejowego przyjęto na podstawie zależności przedstawionej w literaturze [3,4,9]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat jednozakładkowego połączenia klejowego.

W badaniach wykorzystano klej Epidian 57 utwardzony trietylenotetraaminą (utwardzaczem Z1) w temperaturze otoczenia wynoszącej 18 - 20 $^{\circ}\text{C}$, przy wilgotności względnej (35 – 42)%. Czas utwardzania ustalono na poziomie 72 godzin.

Badania przeprowadzono w trzech seriach. W pierwszej serii jako sposób przygotowania powierzchni badanych próbek zastosowano czyszczenie chemiczne środkiem odtłuszczającym Loctite 7063. Dla drugiej i trzeciej serii również użyto Loctite 7063 przed aktywowaniem energetycznym warstwy wierzchniej w atmosferze ozonu. Dla drugiej serii badanych próbek stężenie ozonu wynosiło 2 g/m^3 , natomiast dla trzeciej serii stężenie ozonu wynosiło 12 g/m^3 . Czas ekspozycji próbek w komorze reakcyjnej był stały i wynosił 0,25h.



Rys. 2. Próbką jednoczęściowa – schemat połączenia klejowego

Przed przystąpieniem do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej oraz wykonania połączenia klejowego, dokonano pomiarów chropowatości badanych próbek. Długość odcinka elementarnego przyjęto wg tabeli [5] na poziomie $L_c = 0,8\text{mm}$.

Wartości swobodnej energii powierzchniowej, wyznaczono na podstawie pomiarów wartości kąta zwilżania cieczami pomiarowymi: wodą destylowaną i diiodometanem. Jest to najczęściej spotykany w literaturze [2, 6, 15] sposób wyznaczenia wartości swobodnej energii powierzchniowej dla materiałów konstrukcyjnych. Jedną z metod, która wykorzystuje pomiar kąta zwilżania cieczami pomiarowymi jest metoda Owensa – Wendta w której przyjęto, że swobodna energia powierzchniowa jest sumą dwóch składowych: dyspersyjnej i polarnej. Przyjęto następujące wartości swobodnych energii powierzchniowych cieczy pomiarowych oraz ich składowych polarnej i dyspersyjnej: swobodna energia powierzchniowa wody $\gamma_w = 72,8 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej wody $\gamma_w^p = 51,0 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej wody $\gamma_w^d = 21,8 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, swobodna energia powierzchniowa diiodometanu $\gamma_d = 50,8 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu $\gamma_d^p = 2,3 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu $\gamma_d^d = 48,5 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$ [8, 9, 18, 21]. Pomiar kąta zwilżania zarówno wodą destylowaną jak i diiodometanem był wykonany minimum dziesięć razy na każdej z badanych próbek.

Badania wytrzymałościowe na ścinanie połączeń klejowych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z 100, zgodnie z normą PN-69/C-89300.

WYNIKI BADAŃ

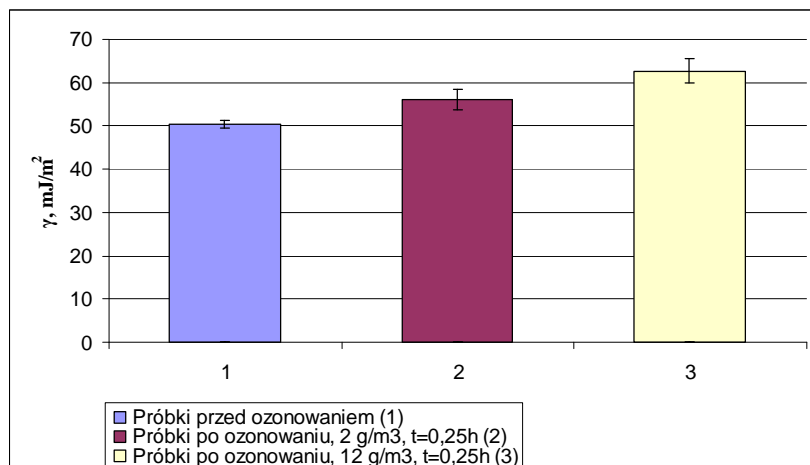
W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości dla próbek wykonanych ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6). Dla każdej serii badań analizowano po siedem próbek.

Tabela 1. Chropowatość powierzchni badanych próbek wykonanych ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6)

| Nr próbki | Ra | Rq | Rz | Rt | Ry | Sm |
|-----------|------|------|------|------|------|-------|
| 1 | 0,61 | 0,87 | 4,00 | 6,77 | 6,60 | 83,67 |
| 2 | 0,63 | 0,85 | 4,33 | 5,93 | 5,93 | 85,00 |
| 3 | 0,50 | 0,63 | 3,47 | 4,60 | 4,30 | 77,00 |
| 4 | 0,53 | 0,69 | 3,60 | 4,47 | 4,23 | 68,00 |
| 5 | 0,65 | 0,83 | 4,00 | 5,07 | 5,07 | 89,00 |
| 6 | 0,59 | 0,79 | 4,00 | 5,93 | 5,73 | 78,67 |
| 7 | 0,54 | 0,75 | 4,00 | 6,30 | 6,07 | 71,33 |

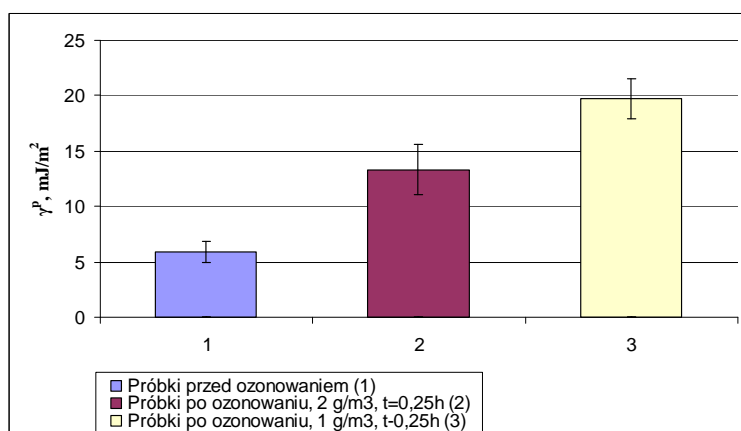
Badane próbki przed pomiarem chropowatości były poddane obróbce mechanicznej – „szorstkowaniu” za pomocą narzędzia nasypowego o ziarnistości P320 w celu usunięcia warstwy fizysorpcyjnej i istniejących tlenków oraz nadania chropowatości struktury nie ukierunkowanej. W każdej serii badań analizowano po siedem próbek. Wyniki przedstawione w tabeli 1 wskazują na dużą powtarzalność cech geometrycznych powierzchni po obróbce ścierniej.

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ stężenia ozonu na wartość swobodnej energii powierzchniowej przy stałym czasie ekspozycji próbek ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6) w komorze reakcyjnej.



Rys. 3. Wpływ stężenia ozonu na wartość swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6) przy stałym czasie ozonowania (0,25h)

Na rysunku 4 przedstawiono wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej (SEP) po ozonowaniu stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6).

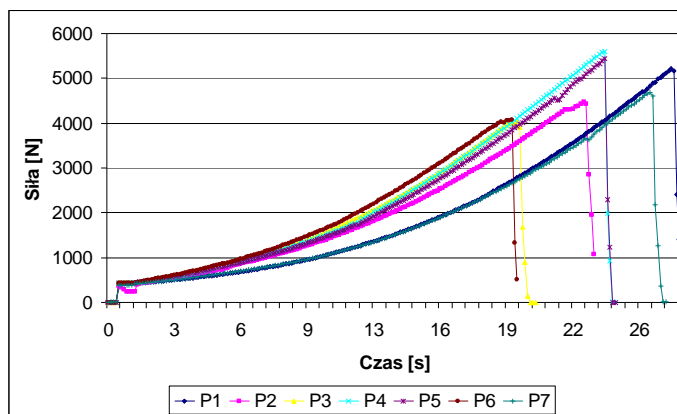


Rys. 4. Wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej po ozonowaniu stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6)

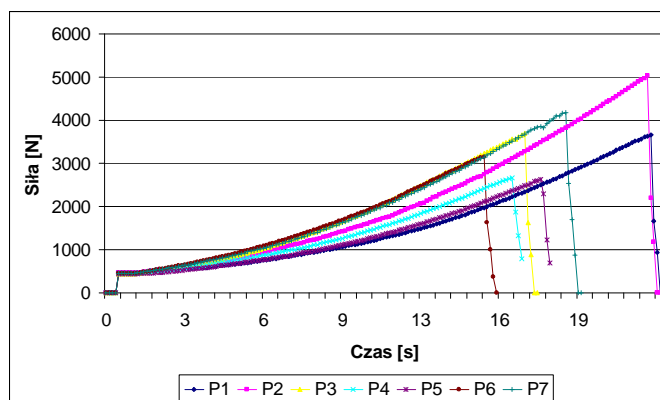
Składowa polarna SEP może mieć duże znaczenie w konstituowaniu wytrzymałości długotrwałej konstrukcyjnych połączeń klejowych. Składowa ta, można przypuszczać, sprzyja powstawaniu wiązań chemicznych pomiędzy klejem i podłożem. W drugiej serii badań zaobserwowano ponad dwukrotny wzrost wartości składowej polarnej, a w trzeciej serii ponad trzykrotny wzrost wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej badanych próbek ze stopu EN-AW-2017A.

Na rysunku 5 i 6 przedstawiono przykładowe przebiegi sił niszczących jednozakładkowe połączenie klejowe w funkcji czasu do zniszczenia. Połączenie zakładkowe wykonano z blach poddanych oczyszczaniu chemicznemu środkiem odtłuszczającym Loctite 7063 przed aktywowaniem energetycznym warstwy wierzchniej w atmosferze ozonu.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi sił niszczących jednozakładkowe połączenie klejowe w funkcji czasu do zniszczenia. Próbki użyte do wykonania połączenia zakładkowego zostały poddane ozonowaniu o stężeniu ozonu 12 g/m^3 w czasie 0,25h.



Rys. 5. Przebiegi sił niszczących jednozakładkowych połączeń klejowych – próbki przed ozonowaniem



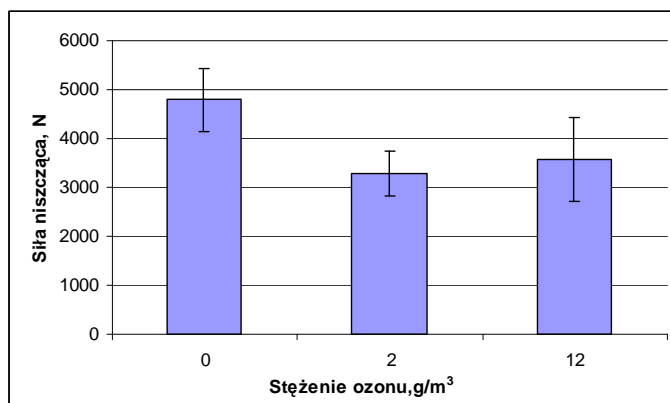
Rys. 6. Przebiegi sił niszczących jednozakładkowych połączeń klejowych – próbki po ozonowaniu w stężeniu ozonu 12 g/m^3 w czasie 0,25h

W tabeli 2 przedstawiono uśrednione wartości sił niszczących uzyskanych w badaniach eksperymentalnych oraz wartości odchylenia standardowego. Jednozakładkowe połączenia wykonano z blachy ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6) przed i po ozonowaniu. Czas ozonowania wynosił 0,25h.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć spadek wartości siły niszczącej próbki po ozonowaniu w stosunku do próbek przed ozonowaniem. Wyniki przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 2. Wartość siły niszczącej uzyskanej w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6)

| | Przed ozonowaniem | Po ozonowaniu - 2g/m ³ | Po ozonowaniu - 12g/m ³ |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Wartość siły niszczącej [N] | 4790 | 3293 | 3570 |
| Odchylenie standardowe | 637 | 462 | 856 |



Rys. 7. Wartości sił niszczących jednozakładkowych połączeń klejowych

Wydłużenie czasu ozonowania nie powodowało dalszego spadku wytrzymałości, wprost przeciwnie zaobserwowano trend wzrostowy, zwiększyła się także wartość odchylenia standardowego. Jest to interesująca obserwacja, wymaga jednak bliższego rozpoznania zmian zachodzących w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej, a zwłaszcza topografii powierzchni.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ich wyników można sformułować następujące wnioski o charakterze ogólnym.

1. Stopy aluminium to bardzo ważna grupa materiałów konstrukcyjnych, stosowanych zwłaszcza w przemyśle samochodowym, lotniczym i kosmicznym, budownictwie i innych, aktywowanie energetyczne warstwy wierzchniej tych materiałów w atmosferze ozonu może być alternatywą dla stosowanych obecnie metod chemicznych, zwłaszcza jeżeli funkcją celu jest podniesienie wartości swobodnej energii powierzchniowej.

2. Znaczny przyrost wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stopu EN-AW-2017A (PA6) uzyskano stosując wyższe stężenie ozonu, przy tym samym czasie ekspozycji, wskazuje to na możliwość skracania tej operacji.

3. Szczególnie istotnym efektem ozonowania jest znaczący wzrost wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, może to mieć istotne znaczenie w konstytuowaniu wytrzymałości długotrwałej konstrukcji połączeń klejowych.

4. Po przeprowadzonych badaniach niszczących jednozakładkowe połączenie klejowe zauważono spadek wartości siły niszczącej, może to być spowodowane powstaniem tlenków słabo związanych z podłożem.

5. Ozonowanie może być proekologiczną technologią wykorzystywaną w przemyśle, wszędzie tam gdzie adhezja odgrywa ważną rolę, jednak zastosowanie tej metody w przemyśle musi być poparte dalszymi badaniami, zwłaszcza w zakresie właściwości fizykochemicznych i cech geometrycznych warstwy wierzchniej poddanych ozonowaniu materiałów.

LITERATURA

1. Blicharski M. Inżynieria powierzchni. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009. ISBN 978-83-204-3421-7.
2. Cataldo Franco: Stability of polyynes in air and their degradation by ozonolysis. *Polymer Degradation and Stability* 91 (2006) 317 – 323.
3. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
4. Godzimirski Jan, Komorek Andrzej: Trwałość zmęczeniowa zakładkowych i czołowych połączeń klejowych. *Przegląd Mechaniczny* nr 12/2008, s. 40 – 44.
5. Humienny Z. (red.): Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych. Oficyna wydawnicza PW, 2001, s. 540.
6. Jańczuk Bronisław, Białopiotrowicz Tomasz.: Swobodna energia powierzchniowa niektórych polimerów. *Polimery*. 32 (1987) 269-271.
7. Kłonica Mariusz, Kuczmazewski Józef: Analiza energetyczna warstwy wierzchniej po ozonowaniu materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle lotniczym. Inżynieria powierzchni. Wybrane zagadnienia. Monografie, Studia, Rozprawy M17 pod redakcją Bogdana Antoszewskiego. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2011 PL ISSN 1897-2691, s. 171-180.
8. Kłonica Mariusz, Kuczmazewski Józef, Ozonek Janusz: Ocena porównawcza właściwości energetycznych warstwy wierzchniej stopu tytanu. *Inżynieria materiałowa*. Nr 5 (171) 2009 s. 396-399.
9. Kuczmazewski J.: Fundamentals of metal-metal adhesive joint design. Politechnika Lubelska. Oddział PAN w Lublinie, 2006.
10. Majda Paweł: Metoda elementów skończonych w analizie zakładkowych połączeń klejowych. *Przegląd Mechaniczny* nr 1/2008, s. 14 – 19.
11. Ozonek J., Fijałkowski S.: Energetyczne i procesowe aspekty produkcji i zastosowań ozonu w technice., Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2007.
12. Rams Beata: Zastosowanie klejenia w połączeniach zgrzewanych metodą FSW. *Przegląd Spawalniczy* nr 3/209, s. 33 – 38.
13. Rudawska A., Kuczmazewski J.: Klejenie blach ocynkowanych. Monografia. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 2005.
14. Rudawska Anna, Dębski Hubert: Modelowanie procesu zniszczenia spoiny klejowej w jednozakładkowym połączeniu klejowym blach aluminiowych. *Mechanik* nr 2/2010, s. 118 – 121.
15. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstw wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.

Badania realizowane w ramach Projektu "Wykorzystanie ozonowania jako ekologicznej metody modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych", Nr 2965/B/T02201039.

COMPARATIVE RESEARCHES OF SHEARING STRENGTH OF SINGLE-LAP ADHESIVE BONDED JOINTS AFTER MECHANICAL CLEANING AND OZONIZATION

Abstract. *The article presents results of comparative research of shearing strength of aluminum alloys single-lap adhesive bonded joints. Application in aerospace industry was the main criterion of material selection. Results of static shearing strength of single-lap adhesive bonded joints for different variations of material preparing (mechanical cleaning and ozonization) were analyzed. The paper ends with conclusions.*

Anna RUDAWSKA
Michał BŁAZIAK
Politechnika Lubelska
Lublin

ANALIZA PORÓWNAWCZA SIŁY NISZCZĄCEJ POŁĄCZENIA KLEJOWE, KLEJOWO-NITOWE ORAZ NITOWE STOPU TYTANU

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESTRUCTIVE FORCE FOR ADHESIVE, ADHESIVE-RIVETED AND TITANIUM ALLOY RIVETED JOINTS

WSTĘP

Klejenie jest jedną z wielu metod wykonywania połączeń nierozłącznych części maszyn. Postęp w dziedzinie doskonalenia jakości klejów, pozwala na coraz szersze stosowanie tych połączeń w wielu odpowiedzialnych konstrukcjach. Połączenia klejowe posiadają wiele zalet (tłumienie drgań, możliwość łączenia różnego rodzaju materiałów, uszczelnianie połączenia itp.), chociaż obciążone są różnymi wadami między innymi małą odpornością na naprężenia normalne, rozciągające [1,2].

Wytrzymałość jest jednym z parametrów charakteryzujących połączenia klejowe, która zależy od wielu czynników technologicznych i konstrukcyjnych [1-5]. Najważniejszymi czynnikami konstrukcyjnymi decydującymi o wytrzymałości połączeń klejowych są: wymiary spoiny, wymiary, kształt i symetria połączenia oraz sposób obciążenia. Do czynników technologicznych można zaliczyć: stan warstwy wierzchniej klejonych powierzchni, dokładność przygotowania masy klejowej, dobór właściwego kleju do projektowanej konstrukcji oraz warunki utwardzania spoiny klejowej (temperatura, czas i nacisk).

Istnieje wiele sposobów zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych, zarówno konstrukcyjnych (np. zmiana konstrukcji połączenia, czy sposobu obciążenia), jak i technologicznych (np. zastosowanie innego rodzaju kleju lub też innego sposobu przygotowania powierzchni). Jednym z wielu sposobów znacznego poprawienia wytrzymałości połączeń klejowych, jest zastosowanie jako dodatkowego łącznika – nitów [1,6-8]. Tego typu połączenia nierozłączne, gdzie występuje zarówno klejenie jak i nitowanie, nazywamy połączeniem klejowo – nitowym. Połączenia klejowo – nitowe mogą zwiększyć wytrzymałość połączeń oraz zmniejszyć ciężar konstrukcji poprzez zmniejszenie liczby nitów oraz zastąpienie połączeń nakładkowych – zakładkowymi.

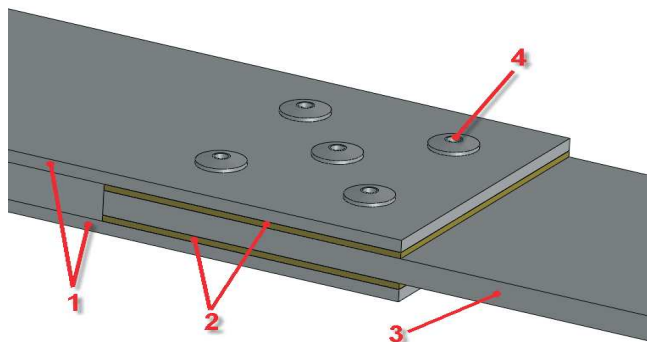
Celem artykułu jest porównanie siły niszczącej połączenia klejowe, nitowe oraz klejowo – nitowe blach tytanowych CP3 wykorzystywanych w przemyśle lotniczym, przy zastosowaniu szwów nitowych jednorzędowych oraz wielorzędowych.

POŁĄCZENIA KLEJOWO-NITOWE

W połączeniach klejowych zakładkowych, na skutek nieosiowego przyłożenia sił występują obok naprężeń stycznych dodatkowe naprężenia rozciągające, skierowane prostopadle do warstwy kleju. Naprężenia te mogą znacznie obniżyć nośność konstrukcyjną połączenia. Rozwiązaniem problemu może być zastosowanie nitów jako elementów dociskających klejone powierzchnie i przenoszących część obciążenia, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie szkodliwych naprężeń odrywających (normalnych).

Połączenia takie charakteryzują się większą wytrzymałością statyczną i dynamiczną, zwłaszcza w warunkach nierównomiernego odrywania. Zapewniają większą niezawodność i żywotność podczas długotrwałej eksploatacji. Jest to rezultatem rozdzielenia naprężeń pomiędzy nity i warstwę kleju oraz zmniejszenie koncentracji naprężeń wokół nitów. Dodatkowa warstwa kleju znajdująca się pomiędzy łączonymi

elementami wypełnia szczeliny połączenia zabezpieczając wewnętrzne powierzchnie przed korozją i uszczelnia je.



Rys. 1. Przykładowe połączenie dwunakładkowe klejowo - nitowe: 1 – dwie nakładki, 2 – dwie warstwy kleju, 3 – wewnętrzna wkładka, 4 - nit [9]

Tego typu połączenie posiada jeszcze kilka dodatkowych zalet, do których możemy zaliczyć: możliwość łączenia różnego rodzaju materiałów, sztywniejszą strukturą połączenia, dwuetapowy proces pęknięcia przed całkowitym zniszczeniem [1,6]. Do wad połączeń klejowo-nitowych możemy zaliczyć: stosunkowo wysokie koszty wykonania połączenia (które związane są ze złożonym procesem technologicznym klejenia oraz nitowania, przyczyniającym się do zwiększenia czasu wykonania tego typu połączenia) oraz zwiększenie ciężaru połączenia.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

• Charakterystyka połączeń klejowych

Do badań wykorzystano połączenia klejowe jednozakładkowe wykonane z blachy ze stopu tytanu CP3, obciążone na ścinanie, którego schemat zamieszczono na rys. 2.

Wymiary łączonych elementów (wykonanych z analizowanych blach) były następujące:

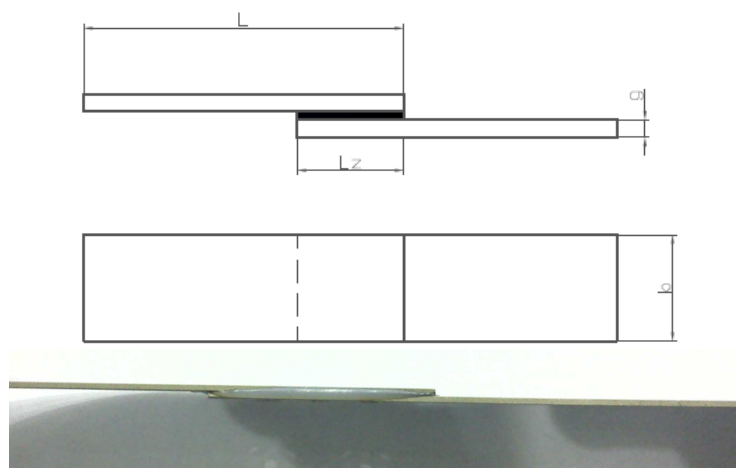
- długość: $l = 100$ mm,
- szerokość: $b = 25$ mm,
- grubość: $g = 1,016$ mm

Do badań wykonano dwa rodzaje połączeń klejowych różniących się długością zakładki spoiny klejowej, wynikającą przede wszystkim z zastosowanych długości zakładki w połączeniach nitowych. Przyjęto długość zakładki wynoszącą $l_z = 16$ mm i $l_z = 32$ mm.

Podczas wykonywania połączeń klejowych zastosowano następujące operacje technologiczne:

1) sposób przygotowania powierzchni blach tytanowych:

- płukanie w wodzie bieżącej o temperaturze 55°C ,
- suszenie,
- płukanie w wodnym roztworze Emulsolu RN – 1 (według zaleceń zakładowych);
- suszenie,
- trawienie (skład kąpieli - kwas solny HCl (1,19) o stężeniu 170 ml/l oraz fluorek sodu NaF 45g/l), temperatura kąpieli wynosiła 25°C , czas trawienia około 12 minut,
- kilkakrotne płukanie w bieżącej wodzie,
- suszenie,
- odtłuszczanie;



Rys. 2. Schemat i widok połączenia klejowego przyjętego do badań

- 2) przygotowanie masy klejowej – w doświadczeniu został użyty klej dwuskładnikowy epoksydowy Loctite 9466. Po odmierzeniu odpowiednich proporcji składniki zostały wymieszane, powstała jednorodna masa klejowa;
- 3) powlekanie powierzchni klejem – klej był наносzony na próbki szpachelką z tworzywa polimerowego, w taki sposób, aby na całej powierzchni zakładki była jednakowa grubość nakładanego kleju;
- 4) łączenie klejonych elementów – przeprowadzono zgodnie z ustaloną długością zakładki oraz wywarcie nacisku ok. 0,2 MPa,
- 5) kondycjonowanie (sezonowanie) przez 72 godziny;
- 6) obróbka wykańczająca – mechanicznie usunięcie naddatku kleju;
- 7) kontrola jakości.

• Charakterystyka połączeń nitowych

Do badań wykorzystano połączenia nitowe jednorzędowe, wykonane za pomocą dwóch nitów, o długości zakładki wynoszącej 16 mm, przedstawione na rys. 3 oraz wielorzędowe o długości zakładki 32 mm, wykonane z użyciem 5 nitów, zaprezentowane na rys. 4.

Połączenia zostały zaprojektowane zgodnie z wytycznymi przedstawianymi w literaturze [10-12]. Podczas wykonywania połączeń nitowych przyjęto średnicę nitu wynoszącą $d_n = 2,4$ mm, a średnicę otworów pod nity: $d = 2,5$ mm. Do łączenia użyto nitów monelowych MS20615-3M3R firmy Hardware. Długość nitu została obliczona na podstawie wzoru 1:

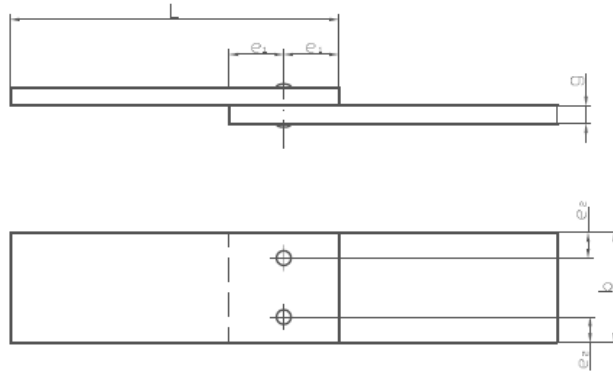
$$l = k \sum g_i + l_0 \quad (1)$$

gdzie:

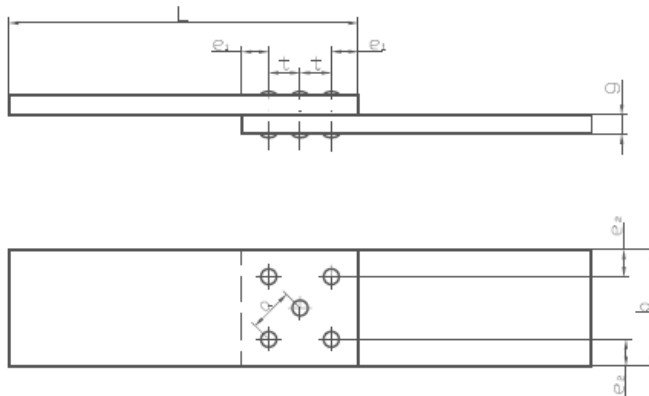
l_0 – nadatek na ukształtowanie zakuwki, dla nitów soczewkowych $l_0 = 0,9d_n$,

k – współczynnik uwzględniający spężanie nitu w otworze (przyjmuje się dla nitów zamykanych na zimno $k=1$, a dla zamykanych na gorąco $k = 1,2 \div 1,05$ (większa wartość odpowiada, mniejszej średnicy nitu),

g_i – grubość łączonych części.



Rys. 3. Schemat połączenia nitowego – szew nitów jednorzędowy



Rys. 4. Schemat połączenia nitowego - szew nitów wielorzędowy

Do obliczeń przyjęto: $k=1$, $\sum g_i=2,032$ mm, $l_0=2,16$ mm, a na podstawie obliczeń długość nitu wyniosła $l=5,2$. Przyjęto długość 6 mm.

Podziałka rozmieszczenia nitów „t” w połączeniu jednorzędowym (rys. 3) została ustalona ze wzoru 2:

$$3d \leq t \leq 9d \quad (2)$$

gdzie:

d – średnica otworu pod nit, t – podziałka rozmieszczenia nitów.

Po podstawieniu minimalna odległość pomiędzy nitami wynosi 7,5 mm, a maksymalna 22,5 mm, w próbkach do badań została przyjęta 8 mm. Odległość minimalną od krawędzi łączonych elementów przyjęto, w kierunku działania obciążenia: $e_1 \geq 2d$ oraz w kierunku prostopadłym do działania obciążenia: $e_2 \geq 1,5d$. Do badań zostały przyjęte następujące odległości: $e_1=8$ mm oraz $e_2=8$ mm.

Podziałkę rozmieszczenia nitów „t” w połączenia wielorzędowych (rys. 4) przyjęto taką samą, jak w połączeniach nitowych jednorzędowych i wynosi 8 mm. Odległość minimalną od krawędzi łączonych elementów wynosiła $e_1=8$ mm oraz $e_2=8$ mm.

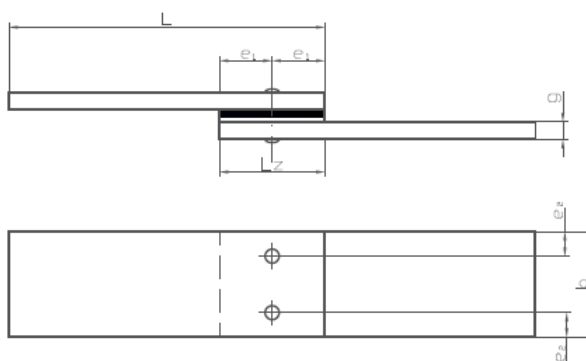
Odległość między rzędami $a \approx 2,6d = 2,6 * 2,5 = 6,5 \approx 8$ mm.

Zarówno dla połączeń ze szwem jednorzędowym, jak i wielorzędowym, technologia wykonywania połączeń była identyczna i składała się z następujących operacji:

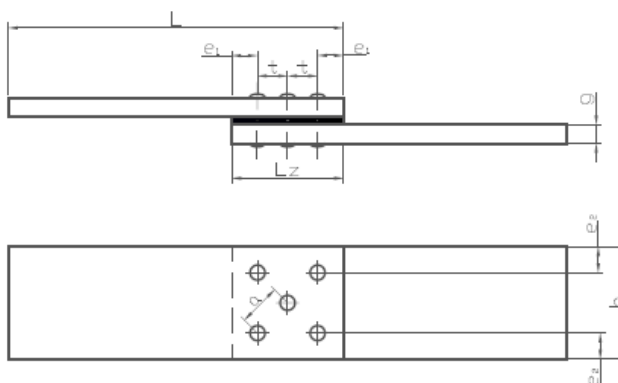
- 1) trasowanie otworów oraz zakładki zgodnie z wymiarami konstrukcyjnymi, napunktowanie rozmieszczenia otworów pod nity;
- 2) ustalenie położenia oraz połączenie dwóch próbek za pomocą ścisków;
- 3) wstępne wiercenie otworów $\varnothing 2$ mm;
- 4) rozwiercenie otworów pod nity $\varnothing 2,5$ mm;
- 5) demontaż zespołu;
- 6) gratowanie wszystkich otworów, wykonanie fazek na krawędziach otworów każdej części;
- 7) ustalenie łączonych detali za pomocą ścisków sprężynowych;
- 8) nitowanie za pomocą praski pneumatycznej;
- 9) kontrola jakości.

• **Charakterystyka połączeń klejowo-nitowych**

Do badań zostały wykonane dwa rodzaje połączeń klejowo-nitowych, uwarunkowanych konstrukcją połączeń nitowych, czyli połączenie klejowo-nitowe ze szwem nitowym jednorzędowym (rys. 3) oraz połączenie klejowo-nitowe ze szwem nitowym wielorzędowym (rys. 4). Zakładka klejowa w połączeniach klejowo-nitowych jednorzędowych równa jest $l_{z1} = 16$ mm, a w wielorzędowych wynosi $l_{z2} = 32$ mm. Rozmieszczenie nitów jest przedstawione na rys. 5 i rys. 6.



Rys. 5. Schemat połączenia klejowo-nitowego: szew nitów jednorzędowy



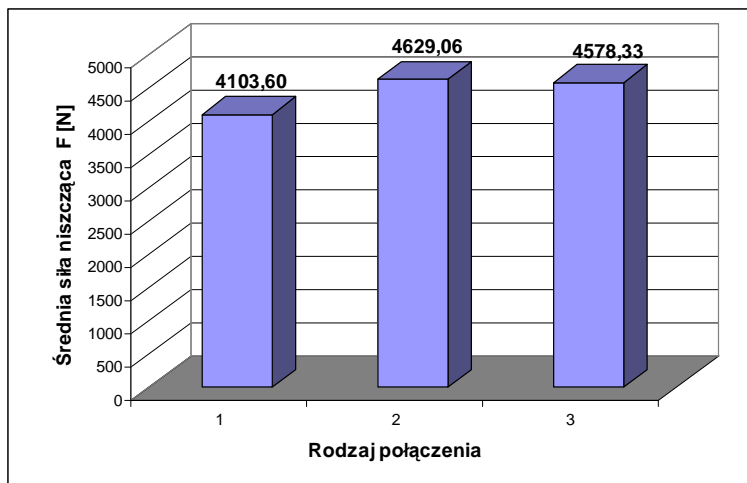
Rys. 6. Schemat połączenia klejowo-nitowego - szew nitów wielorzędowy

Technologia klejenia została wykonana w taki sam sposób, jak w przypadku połączeń klejowych. Po 72 godzinach sezonowania, połączenie zostało zanitowane. Połączenia nitowe powstały według technologii przedstawionej dla połączeń nitowych.

Po wykonaniu analizowanych rodzajów połączeń, poddano je badaniom wytrzymałościowym, pozwalającym na określenie i porównanie siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe.

WYNIKI BADAŃ

Porównanie otrzymanych wyników siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe stopów tytanu CP3, w przypadku długości zakładki wynoszącej $l_z=16$ mm i szwu jednorzędowego przedstawiono na rys. 7. Na rys. 8 natomiast zamieszczono wyniki badań analizowanych rodzajów połączeń, ale charakteryzujących się długością zakładki równą 32 mm.

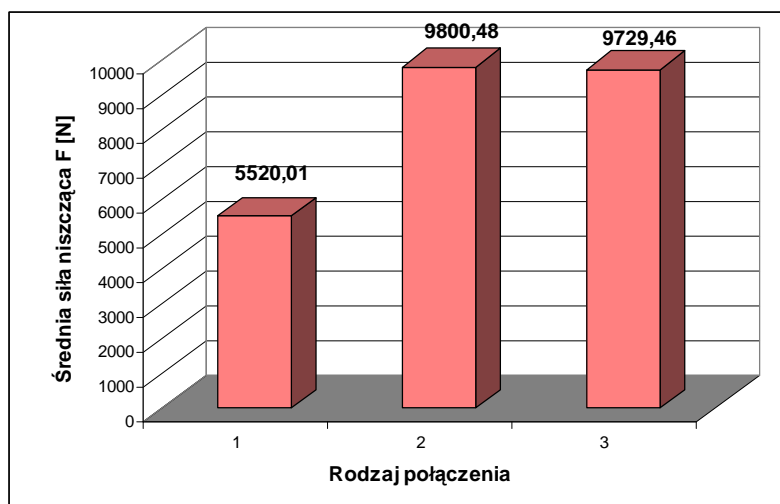


Rys. 7. Średnia wartość siły niszczącej połączeń z zakładką $l_z=16$ mm: 1 – połączenie klejowe, 2 – połączenie nitowe jednorzędowe, 3 - połączenie klejowo – nitowe

Otrzymane wyniki badań doświadczalnych poddano analizie statystycznej, na podstawie której stwierdzono, że otrzymano statystycznie istotne różnice w analizowanych wartościach siły niszczącej we wszystkich badanych połączeniach na poziomie istotności $\alpha=0,05$.

Na podstawie rys. 7 można zauważyć, że w grupie połączeń z zakładką równą $l_z=16$ mm, najmniejszą wartość siły niszczącej otrzymano w przypadku połączenia klejowego i wyniosła ona 4103,60 N. Największa wartość została uzyskana w połączeniu nitowym (4629,06 N) i była wyższa o 12% od najmniejszej wartości. Po dodaniu dwóch nitów do połączenia klejowego, została podwyższona wartość siły niszczącej o około 11%, w stosunku do połączenia klejowego, w przypadku połączenia nitowego natomiast dodanie warstwy kleju zmniejszyło nieznacznie – 2% tę wartość w stosunku do połączenia nitowego.

Dwukrotne zwiększenie zakładki w połączeniach klejowych z 16 mm na 32 mm, zwiększyło jego wytrzymałość o około 24% (rys. 8). W przypadku połączeń nitowych zwiększenie ilości nitów z dwóch na pięć, spowodowało wzrost wartości siły niszczącej o około 110%, natomiast w połączeniach klejowo-nitowych identyczne zwiększenie zakładki oraz ilości nitów zwiększyło wartość siły o około 112%.



Rys. 8. Średnia wartość siły niszczącej połączeń z zakładką $l_z=32$ mm: 1 – połączenie klejowe, 2 – połączenie nitowe jednorzędowe, 3 – połączenie klejowo – nitowe



Rys. 9. Widok zniszczonej próbki klejowo-nitowej: szew nitów wielorzędowy

Na rys. 9 przedstawiono widok zniszczonego połączenia klejowo-nitowego wielorzędowego o długości zakładki wynoszącej $l_z=32$ mm. Można zauważyć znacznie większe zniszczenie skrajnych nitów oraz odkształcenie łączonego materiału.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy statystycznej wyników tych badań można zauważyć, że:

- największa siła niszcząca wystąpiła w połączeniach nitowych wielorzędowych, najmniejsza zaś w połączeniach klejowych z zakładką $l_z=16$ mm;
- wzmocnianie połączenia klejowego zakładkowego poprzez wprowadzenie nitów wpłynęło na poprawę wytrzymałości i sztywności połączenia, w przypadku połączenia klejowego z zakładką $l_z=32$ mm wartość siły niszczącej wzrosła prawie dwukrotnie, przy połączeniu z zakładką $l_z=16$ mm był to znacznie mniejszy wzrost, w granicach 11%;
- analizując odchylenia standardowe wszystkich połączeń można zauważyć że, w przypadku połączeń klejowych była najmniejsza powtarzalność wyników, natomiast największą została uzyskana w połączeniach nitowych oraz klejowo-nitowych. W przypadku połączenia nitowego wielorzędowego oraz przy połączeniu klejowo-nitowym uzyskano powtarzalność w granicach 1% w stosunku do średniej arytmetycznej siły niszczącej.

Według dostępnej literatury połączenia klejowo-nitowe powinny posiadać największą siłę niszczącą, można zauważyć, że połączenie klejowo-nitowe z zakładką $l_z=16$, ma mniejszą wartość od połączenia nitowego jednorzędowego z tą samą zakładką, ten sam przypadek (rys. 8) występuje w połączeniu z zakładką $l_z=32$ mm. Prawdopodobnie spowodowane jest to dwoma względami. Po pierwsze, utwardzona warstwa kleju Loctite 9466 charakteryzuje się znaczną sztywnością (moduł sprężystości postaciowej tego kleju równy jest $G_k=1718$ MPa). Fakt ten powoduje, że warstwa kleju jest bardzo wrażliwa na uszkodzenia w trakcie zamykania nitów, a część siły potrzebnej do uformowania zakuwki jest przenoszona na warstwę kleju. Powoduje to lokalne (wokół łba nitu) uszkodzenia utwardzonej warstwy kleju, co z kolei obniża wytrzymałość spoiny. Dowodem na to są widoczne na rys. 9 pierścienie wokół nitu wielkość średnicy łba nitu. Rozwiązaniem tego problemu może być np. zmiana sposobu nitowania, standardowe nitowanie prasą pneumatyczną zamienić na nitowanie radialne. Drugi czynnik, który być może wpłynął na ten fakt, to wysokość zakuwki. W połączeniach klejowo-nitowych była ona większa o 1 mm od zakuwki w połączeniach nitowych. Fakt zwiększenia zakuwki był spowodowany problemem rozwarstwiania się próbek klejowych podczas nitowania.

Podsumowując można zauważyć, że wytrzymałość połączeń klejowych, nitowych, oraz klejowo-nitowych uwarunkowana jest konstrukcją i technologią ich wykonania. W przeprowadzonych badaniach połączenia nitowe zostały zaprojektowane zgodnie z literaturą, natomiast długość zakładki w połączeniach klejowych została przyjęta zgodnie z zakładką w połączeniach nitowych, niewątpliwie fakt ten również miał wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych. Ze względu na specyfikę połączeń klejowych stosowanie różnych rodzajów klejów, ma wpływ na wytrzymałość tych połączeń. W połączeniu klejowo-nitowym klej pełni dodatkową rolę, chroniąc materiał przed korozją oraz pełniąc funkcję uszczelniacza, co jest istotne w wielu konstrukcjach.

LITERATURA

1. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
2. Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika, Praca zbiorowa pod red. Ch. V. Cagle'a, WNT, Warszawa, 1977.
3. Czaplicki J i in.: Klejenie tworzyw konstrukcyjnych, WKŁ, Warszawa, 1987.
4. Kuczmazewski J.: Technologia Śmigłowców. Teoria i technika klejenia. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 1990.
5. Rudawska A., Kuczmazewski J.: Klejenie blach ocynkowanych. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 2005.
6. Perłowski R.: Ocena wytrzymałości statycznej montażowych, zakładkowych połączeń klejowych i klejowo-nitowych. Technologia i Automatyzacja Montażu, 1/2002, s. 33-37.
7. Perłowski R.: Technologia i właściwości połączeń klejowo – nitowych. Technologia i Automatyzacja Montażu, 02/2007, s. 124-127
8. Gomez S., Onoro J., Pecharroman J.: A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint. Int. J. Adhesion and Adhesives (27) 2007, 263-267.
9. www.pkaero.prz.edu.pl/sprawozdania/KONF-28-29-06-2010/plakaty/ZB-15-2.pdf 09/2010.
10. Dietrich M.: Podstawy konstrukcji maszyn tom II. WNT, Warszawa 1999.
11. Porębska M., Skorupa A.: Połączenia spójnościowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
12. Rutkowski A.: Części maszyn. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna, Warszawa 1994.



Praca realizowana w ramach projektu nr POIG. 01.01.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESTRUCTIVE FORCE FOR ADHESIVE, ADHESIVE-RIVETED AND TITANIUM ALLOY RIVETED JOINTS

Abstract. *The article presents comparative analysis of destructive force values for adhesive, adhesive-riveted and titanium alloy riveted joints, widely applied in aircraft industry. The analysis was conducted for three types of assembly joints: adhesive, adhesive-riveted and riveted. The two joints variants considered differed in the length of the lap, the number and the distribution of rivets. The riveted and adhesive-riveted joints tested included two or five rivets. Moreover, two lap lengths were applied for all the tested joint types (adhesive, adhesive-riveted, riveted), 16 and 32 mm. In the case of single-riveted joints (2 rivets) the lap length was 16mm, while for the other sample (5 rivets) – 32 mm. The results of the tests led to observe the increase of the destructive force value in the case of adhesive joints with the increase of the lap length. The observation was not dissimilar for the riveted and adhesive-riveted joints. The comparison of the three joint types of equal lap length indicated that the destructive force value for adhesive-riveted and riveted joints difference was negligible, while lower values could be observed in the case of adhesive joints.*

Ivan OBORSKIY
Kijowski Uniwersytet
Technologii i Projektowania
Kijów, Ukraina

TECHNOLOGICZNE I NAUKOWE PODSTAWY REALIZACJI MONTAŻU POŁĄCZEŃ WCISKANYCH SPOSOBEM TERMICZNYM (TKSS)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ СПОСОБОМ КТСС

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время до ряда ответственных изделий машиностроения (многоэлементных изделий колесных пар подвижного состава железнодорожного транспорта, соединений тонкостенных втулок подшипников скольжения с корпусными деталями машин горных разработок и строительной техники, валов с зубчатыми колесами несущих узлов редукторов, направляющих втулок и седел клапанов с головками блоков двигателей внутреннего сгорания, веретен кольцепрядильных машин легкого и текстильного машиностроения и др.), включающих соединения деталей с натягом, предъявляются повышенные требования по прочности и эксплуатационной надежности [1-3]. Для решения этой важной проблемы, как правило, увеличивают сборочные натяги, применяют дополнительные элементы крепления деталей в соединениях.

Для формирования таких посадок широкое применение получили технологии с использованием термических способов с нагреванием или охлаждением сопрягаемых деталей. При этом следует отметить, что эти способы зачастую являются энергоемкими и не позволяют качественно собирать соединения с относительно большими натягами (например, для деталей из конструкционных сталей более 2-3 мкм/мм). Наряду с этим увеличение сборочных натягов приводит к росту напряженно-деформированного состояния изделий. Применение дополнительных элементов крепления деталей в соединениях, как правило, приводит к повышению металлоемкости изделий и не всегда обеспечивает их необходимую надежность при эксплуатации.

Особенно большой интерес представляет перспектива использования для качественного формирования соединений с натягом комбинированного термического способа сборки (КТСС) – с одновременным пониженным неравномерным нагревом и низкотемпературным охлаждением сопрягаемых деталей. При этом за счет понижения температуры термовоздействия на каждую из сопрягаемых деталей повысится качество соединения, представится возможность исключить изменение физико-механических свойств материалов, снизить величину сборочного натяга, напряженно-деформированное состояние деталей, тепловые потери, энергетические и временные затраты. Также КТСС позволит увеличить термический сборочный зазор, что откроет перспективы использования новых видов и топологии микрорельефа и макрорельефа, различных прослоек для повышения фактической площади и плотности зоны их контакта, что обеспечит повышение прочности соединений. Увеличение сборочного зазора упростит операцию ориентирования и совмещения сопрягаемых деталей без непосредственного их контакта, что даст возможность сохранить исходный микрорельеф контактных поверхностей сопрягаемых деталей, использовать при этом более простые сборочные устройства.

Однако, термическая сборка выполняется зачастую при достаточно высоких температурах нагревания или глубокого охлаждения сопрягаемых деталей, что делает ее достаточно энергоемким технологическим процессом и продолжительным по времени. Поэтому необходимо изыскание путей, обеспечивающих снижение энергозатрат, например, за счет применения регулярного

микро рельефа, обеспечивающего повышенную прочность посадок и возможность снижения величины сборочного натяга, снижение уровней нагрева и охлаждения сопрягаемых деталей перед сборкой. Это позволит сократить продолжительность цикла сборки, тепловые потери, уменьшить время нагрева и охлаждения сопрягаемых деталей. Эти преимущества позволят эффективно использовать этот технологический процесс в массовом производстве.

В связи с изложенным повышение качества соединений с натягом, снижение энергоемкости и временных затрат путем создания технологического обеспечения сборки на этапах термовоздействия - взаимное совмещение деталей с использованием комбинированного термического способа сборки является актуальной задачей при создании машин и механизмов.

СУЩНОСТЬ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологической основой исследований является системный подход к изучению исследуемого объекта – технологии формирования соединений с натягом с использованием комбинированного термического способа сборки, специальной топологии микро рельефа на сопрягаемых поверхностях деталей и промежуточных прослоек в зоне контакта. Для решения поставленных задач использованы фундаментальные положения технологии машиностроения, теории пластичности, упругости и теплопроводности, методов оптимизации, теории вероятности, математической статистики и МКЭ, а также компьютерного программирования.

Обсуждение результатов исследований. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили предложить методологию и получить расчетные зависимости для определения технологических параметров, обеспечивающих энергосберегающую сборку соединений с натягом КТСС.

Установлено, что для качественной реализации технологии КТСС возможна совокупность различных технологических вариантов КТСС, при которых предварительное термовоздействие на сопрягаемые детали и сочетания в них температур в момент начального контакта может быть полным, неполным, частичным или местным. Обоснованы принципы направления подвода тепла или холода к сопрягаемым деталям (изнутри или снаружи) при неравномерном на них термовоздействии и определения температуры нагревания $T_{\text{нагр}}$ охватывающих и низкотемпературного охлаждения $T_{\text{охл}}$ охватываемых деталей с учетом их распределения в зависимости от толщины их стенок и типа производства.

Следует отметить, что при разработке структуры технологии КТСС очень важно знать, какое значение должны иметь увеличение посадочного диаметра Δd_a охватывающей детали при ее нагревании и уменьшение Δd_b охватываемой при ее низкотемпературном охлаждении, которые необходимы для создания требуемого временного теплового сборочного зазора S для качественной реализации сборки соединений с натягом. В процессе выполнения технологии КТСС сопрягаемые детали терпят тепловые потери, с которыми взаимосвязаны энергетические затраты при КТСС. Предложено выразить потери (затраты) тепла и холода сопрягаемыми деталями через коэффициент $\kappa_{\text{сб}}$ условий реализации сборки (тепловых потерь). Принято, что этот коэффициент учитывает: геометрические параметры сопрягаемых деталей и физико-механические свойства их материалов; температуры сопрягаемых деталей и их тепловые потери во времени выполнения технологических операций сборочного цикла; режимы выполнения технологических операций во времени с помощью используемой сборочной оснастки или без нее.

На основании выполненных комплексных теоретических исследований получены расчетные зависимости, позволяющие определить при подводе тепла (или холода) снаружи или изнутри тонкостенного и толстостенного цилиндра (соответственно при линейном и логарифмическом законах распределения температуры по толщине его стенок при заданном времени термовоздействия) соотношение температур на наружной T_n ($T_{n,\text{лин}}$, $T_{n,\text{лог}}$) и внутренней T_v ($T_{v,\text{лин}}$, $T_{v,\text{лог}}$) его поверхностях, соответственно

$$T_{н.лин} = T_{в.лин} \frac{3+m}{3+2m} \quad (1) \quad \text{и} \quad T_{н.лог} = T_{в.лог} \frac{m \cdot (2+m) - \ln(1+m)^2}{\ln(1+m)^2 \cdot (1+m)^2 - m(2+m)}, \quad (2)$$

где $m = r_n/r_v - 1$, где r_n и r_v – наружный и внутренний радиусы цилиндра.

Анализ полученных зависимостей (1, 2) показал, что для получения, например, равной величины изменения внутреннего диаметра при нагревании детали следует подводить тепло по наружной ее поверхности с температурой T_n , которая будет ниже температуры T_v в случае подвода тепла к внутренней поверхности цилиндра.

Рассмотрим (рис. 1, 2) законы линейного и логарифмического распределения температуры при КТСС соответственно в тонкостенных (рис. 1) и толстостенных (рис. 2) деталях: а – при нагревании охватывающей; б – при низкотемпературном охлаждении охватываемой.

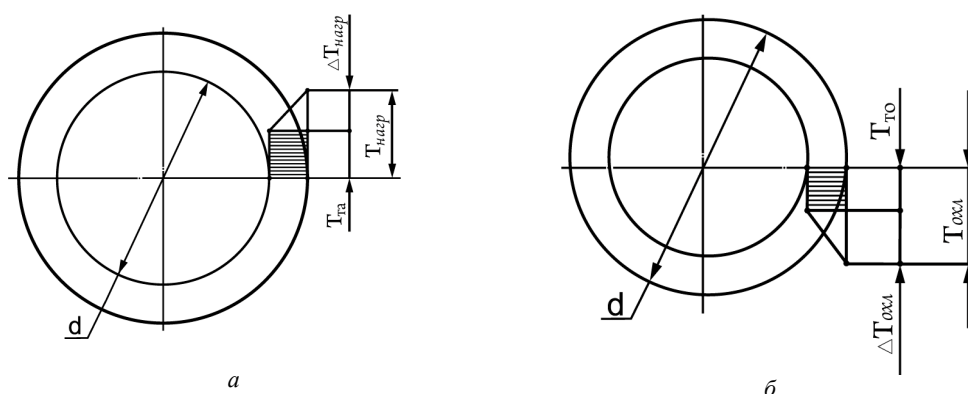


Рис. 1. Линейное распределение температуры при КТСС тонкостенных деталей: а – при нагревании охватывающей; б – при низкотемпературном охлаждении охватываемой

Rys. 1. Liniowy rozkład temperatur przy KTSS w cienkościennych elementach;
a) przy nagrzewaniu części obejmującej; b) przy chłodzeniu części obejmowanej

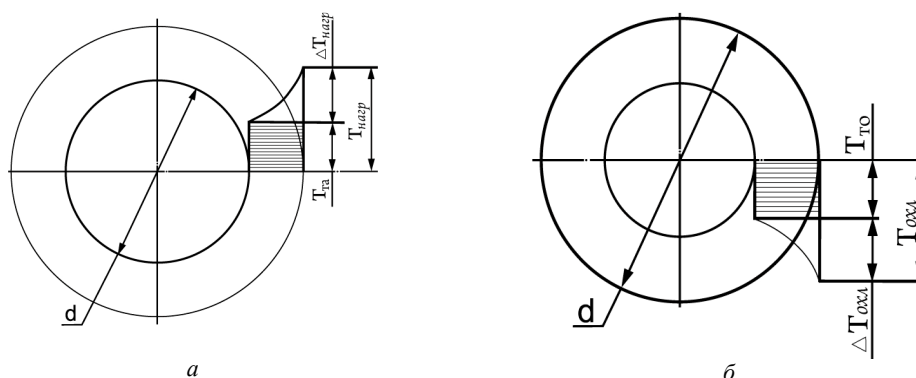


Рис. 2. Логарифмическое распределение температуры при КТСС толстостенных деталей: а – при нагревании охватывающей; б – при низкотемпературном охлаждении охватываемой

Rys 2. Logarytmiczne rozkłady temperatur przy KTSS grubościennych części;
a) przy nagrzewaniu części obejmującej; b) przy chłodzeniu części obejmowanej

Приняв, что $T_{\text{нагр}} = \Delta T_{\text{нагр}} + T_{\text{Ta}}$, $T_{\text{охл}} = \Delta T_{\text{охл}} + T_{\text{To}}$, где T_{Ta} и T_{To} – температуры, установившиеся в охватывающей детали при ее нагревании и в охватываемой при ее низкотемпературном охлаждении, $\Delta T_{\text{нагр}}$ и $\Delta T_{\text{охл}}$ – перепады температур между наружной и внутренней поверхностями сопрягаемых деталей для заданных распределений температуры по толщине стенок и подвода тепла, в частности, по наружной поверхности для заданных значений величины теплового зазора, в работе получены зависимости для определения рациональных температур.

Для тонкостенных деталей (рис.1) предложены зависимости для расчета рациональных температур (для линейного закона их распределения) полного нагрева $T_{\text{нагр}}$ охватывающей детали и полного низкотемпературного $T_{\text{охл}}$ охлаждения охватываемой, соответственно

$$T_{\text{Ta}} + \Delta T_{\text{нагр}} \frac{3 + 2m_a}{6 + 3m_a} = \frac{\Delta d_a}{d \cdot \alpha_p} \quad (3) \quad \text{и} \quad T_{\text{To}} + \Delta T_{\text{охл}} \frac{3 + 2m_b}{6 + 3m_b} = \frac{\Delta d_b}{d \cdot \alpha_{\text{ск}}}, \quad (4)$$

где α_p и $\alpha_{\text{ск}}$ – коэффициенты линейного расширения для материала охватывающей и сжатия для охватываемой деталей; $m_a = r_{\text{на}}/r_{\text{ва}} - 1$, где $r_{\text{на}}$ и $r_{\text{ва}}$ – наружный и внутренний радиусы для охватывающей детали; $m_b = r_{\text{нв}}/r_{\text{вв}} - 1$, где $r_{\text{нв}}$ и $r_{\text{вв}}$ – наружный и внутренний радиусы для охватываемой детали.

Предложены зависимости, позволяющие определить рациональные температуры (для логарифмического закона распределения) полного нагревания $T_{\text{нагр}}$ охватывающей детали при подводе к ней тепла по наружной поверхности (рис. 2) и охлаждения $T_{\text{охл}}$ охватываемой детали, соответственно

$$T_{\text{Ta}} + \Delta T_{\text{нагр}} \left[(1 + m_a)^2 - \frac{m_a(2 + m_a)}{\ln(1 + m_a)^2} \right] = \frac{\Delta d_a}{d \alpha_p} m_a(2 + m_a), \quad (5)$$

$$T_{\text{To}} + \Delta T_{\text{охл}} \left[(1 + m_b)^2 - \frac{m_b(2 + m_b)}{\ln(1 + m_b)^2} \right] = \frac{\Delta d_b}{d \alpha_{\text{ск}}} m_b(2 + m_b). \quad (6)$$

На основании выполненных автором исследований установлены возможные варианты сборки соединений с натягом способом КТСС и сочетания температур в сопрягаемых деталях (с полным, неполным, частичным и местным термовоздействием на сопрягаемые тонкостенные и толстостенные детали) при подводе к ним тепла как снаружи, так и изнутри. На основании этих данных установлены соотношения температуры неравномерного термовоздействия и температуры $T_{\text{ст}}$ условно равномерного термовоздействия на сопрягаемые детали для обеспечения требуемого изменения посадочного диаметра.

Таким образом полученные аналитические зависимости позволяют определять изменения $\Delta d_{\Sigma \text{лин}}$ и $\Delta d_{\Sigma \text{лог}}$ диаметра d посадки сопрягаемых деталей (охватывающей Δd_a и охватываемой Δd_b), а также уровни температур их нагревания и низкотемпературного охлаждения, в которых в отличие от существующих методов расчета учтено влияние толщины стенок сопрягаемых деталей, режимов нагревания и низкотемпературного охлаждения, направления подвода к ним тепла и холода при линейном и логарифмическом законах распределения температур по толщине деталей, что позволило создать методику выбора рациональных значений технологических параметров сборки, обеспечивающих снижение энергетических, временных затрат и оптимальный выбор технологического оборудования и теплоносителей.

Зная суммарное значение Δd_{Σ} увеличения Δd_a диаметра посадки охватывающей детали при ее нагревании и уменьшения Δd_b охватываемой при охлаждении, величину теплового зазора $S = \Delta d_{\Sigma} - N_{\text{макс}}$, а также коэффициент условий сборки $k_{\text{сб}}$, в работе предложены зависимости для определения

угла γ перекося осей сопрягаемых деталей для вертикальной и горизонтальной схем сборки с учетом временного характера изменения величины теплового зазора и геометрических параметров сопрягаемых деталей в процессе их взаимного ориентирования и совмещения.

Что бы установить закономерности процесса ориентирования при КТСС и его параметры, были рассмотрены условия равновесия в момент начала контакта деталей при вертикальной и горизонтальной схемах сборки и получена система уравнений. Решение этих уравнений позволило найти допустимый угол перекося осей сопрягаемых деталей для вертикальной (7) и горизонтальной (8) схем сборки с учетом взаимосвязи во времени и пространстве, соответственно

$$\gamma_b \leq \arctg \left(\frac{d - \Delta d_a - \Delta d_b + N - S_{\min}}{L} \right), \quad (7) \quad \gamma \leq \arccos \frac{d_b - \Delta d_b + N_{\max} - S_{\min}}{d_a + \Delta d_a}, \quad (8)$$

$$\text{где} \quad \Delta d_{\text{уад}} = \Delta T_{\text{уад}} \cdot \alpha_p \cdot d \cdot e^{A_a B_a \tau_y}, \quad \Delta d_{\text{увд}} = \Delta T_{\text{увд}} \cdot \alpha_{сж} \cdot d \cdot e^{A_b B_b \tau_y},$$

$$\Delta d_{\text{уат}} = \Delta T_{\text{уат}} \cdot \alpha_p \cdot d \cdot e^{A_a B_a \tau_y}, \quad \Delta d_{\text{увт}} = \Delta T_{\text{увт}} \cdot \alpha_p \cdot d \cdot e^{A_b B_b \tau_y}, \quad (9)$$

$\Delta T_{\text{уад}}, \Delta T_{\text{увд}}$ и $\Delta T_{\text{уат}}, \Delta T_{\text{увт}}$ – перепады температур между сопрягаемыми деталями, мехду отдельными деталями и технологической сборочной оснасткой; A_a, A_b, B_a, B_b – усредненные величины, которые характеризуют соответственно свойства материалов сопрягаемых деталей и их геометрические параметры.

Полученные аналитические зависимости (7) – (9) позволяют определять не только допустимые углы перекося осей деталей при сборке, но и характер временного их изменения при КТСС. Такой подход к определению углов перекося позволит определиться с видом и конструктивным исполнением модулей ориентирования и взаимной сборки многоэлементных соединений деталей, методикой расчетов взаимосвязанных во времени и пространстве конструктивных размеров сборочного устройства.

На основании выполненных теоретических исследований также научно обосновано возможность использования схем бесконтактного совмещения и окончательного ориентирования нагретых и охлажденных сопрягаемых деталей и на этой основе разработаны новые способы выполнения этих операций и устройства для их реализации.

В работе установлено, что соединения с натягом имеют широкую номенклатуру осе симметричных деталей с относительно малыми, средними и большими размерами диаметров посадки и длины, внешними размерами, а также различной массы. Решение задачи сборки каждой номенклатура деталей имеет свою специфику, связанную с продолжительностью операций сборки. Поэтому в работе были рассмотрены технологические решения, связанные с разработкой структуры затрат времени $\tau_{сб}$ и получены аналитические зависимости для определения времени предварительного низкотемпературного охлаждения и нагревания, транспортирования, взаимного ориентирования и установки, начального контакта и скрепления деталей с заданным натягом. При этом установлено, что расчет времени выполнения технологических операций сборки в условиях неравномерного термовоздействия и определение изменения при этом посадочного диаметра необходимо проводить по условно установившейся температуре деталей.

Уменьшение временных затрат также существенно зависит от продолжительности процесса формирования соединения с внедрением микрорельефа и создания при этом промежуточной динамичной прочности, изменяемой во времени. Зачастую соединение нет смысла выдерживать на сборочной позиции до окончательного формирования зоны контакта, а снимать его в какой-то промежуток внедрения микрорельефа и достижения промежуточной прочности. Поэтому в работе разработаны зависимости для определения временных параметров с учетом формирования зоны

контакта. В отличие от существующих методов научно обоснован новый подход по определению допустимых затрат времени на выполнение технологических операций КТСС и выбор его структуры, позволяющих оптимизировать технологию формирования посадок с натягом при незначительных тепловых и энергетических затратах. Выполненные теоретические исследования позволили создать методологию определения всего комплекса конструктивно-технологических параметров технологии, обеспечивающих КТСС соединений с натягом, с учетом теплофизических и механических характеристик материалов сопрягаемых деталей, изменения их конструктивных параметров, снижения временных и энергетических затрат. На этой основе предложена новая методика выбора и проектирования типовых устройств, обеспечивающих нагрев, охлаждение, транспортирование, ориентирование, совмещение и непосредственную сборку.

Для оперативного использования полученных результатов при проектировании технологии и технологической оснастки и оборудования для сборки разработаны специальные графоаналитические способы определения технологических параметров для качественной реализации энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом способом КТСС. Предлагаемые графоаналитические способы созданы с учетом технологических параметров, которые гарантируют прочность соединений с натягом и условия осуществления их бесконтактной сборки при вертикальной и горизонтальной схемах ориентирования деталей.

ВЫВОДЫ

Разработана методология определения технологических параметров, обеспечивающих качественную реализацию сборки и создание методики проектирования технологии формирования соединений с натягом способом КТСС (комбинированным термовоздействием – нагревом и низкотемпературным охлаждением на сопрягаемые детали с учетом теплофизических и механических характеристик их материалов, изменения конструктивных параметров, снижения временных и энергетических затрат).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборский И. Л., Андреев А.Г., Щепкин А.В., Дворжак В.М. Разработка технологии сборки и конструкции составного колеса электровагона. //Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: Сборник научных работ. Тематический выпуск: Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 36. – С. 147–153.
2. Оборский И.Л. Определение технологических параметров рациональной энергосберегающей технологии формирования соединений с натягом при КТСС / И.Л. Оборский // 10-я Международная научно-практическая конференция с действующими семинарами "Качество, стандартизация, контроль: Теория и практика. Крым, г. Ялта. 27 сентября – 01 октября 2010 г. – С. 108-110.
3. Оборский И.Л. Выбор технологических параметров рациональной энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом, осуществляемой термическими способами / И.Л. Оборский // Сб.: Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции "Качество технологий–качество жизни". 15 – 19 сентября 2010, г. Судак, Украина. – 2010. – С. 74 – 76.

TECHNOLOGICAL AND SCIENTIFIC BASES OF THE GUARANTEE OF REALIZATION OF ASSEMBLING CONNECTIONS WITH THE STRAINING BY METHOD KTSS

Abstract. *There are given the results of the theoretical and experimental studies, which made possible to propose methodology and to get calculated dependences for determination of the technological parameters, which guarantee the realization of the energy-saving assembling of connections with the straining by method KTSS.*

Ivan OBORSKIY
Artiem OBORSKIY
Anatolij ZENKIN
Anna KOSZEL
Kijowski Uniwersytet
Technologii i Projektowania
Kijów, Ukraina

PROJEKTOWANIE ENERGOOSZCZĘDNEJ TECHNOLOGII MONTAŻU POŁĄCZEŃ WCISKANYCH SPOSOBEM TERMICZNYM

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМОЙ ТЕРМИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных научно-технических проблем технологии машиностроения является создание соединений с натягом с минимальными энергозатратами. Успешное решение этой задачи требует при проектировании технологии сборки учета множества входных факторов и нормированных технологических сборочных параметров, взаимосвязанных во времени и пространстве. В частности, при сборке соединений с натягом способом КТСС (с использованием нагрева и низкотемпературного охлаждения сопрягаемых деталей) необходимо определить нормированные величины необходимого увеличения посадочного диаметра нагреваемой охватываемой детали и его уменьшение для охватываемой при низкотемпературном охлаждении. Правильный выбор этих параметров позволит обеспечивать временно образованный зазор при взаимном соединении деталей без непосредственного контакта их сопрягаемых поверхностей. Использование такого подхода к выбору методологии определения нормированных сборочных параметров и проектировании технологии позволит производителям при минимальных затратах создавать современные изделия с соединениями с натягом при минимальных энергетических и временных затратах [1, 2, 3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований получены зависимости, которые позволят производить разработку рациональной структуры технологического процесса сборки, обеспечивающего энергосбережение при КТСС.

Для решения этой задачи изначально принят коэффициент соотношения увеличения посадочного диаметра d охватываемой детали при ее неравномерном нагревании Δd_a к уменьшению посадочного диаметра d охватываемой при ее неравномерном низкотемпературном охлаждении Δd_e

$$k_{\Delta d} = \frac{\Delta d_a}{\Delta d_e}. \quad (1)$$

Приняв при исследованиях затраты на нагрев охватываемой и низкотемпературное охлаждение охватываемой деталей, необходимое суммарное Δd_{Σ} увеличение посадочных

диаметров охватывающей детали при ее нагревании и уменьшение для охватываемой при ее низкотемпературном охлаждении Δd_a и Δd_b , которые обеспечат требуемый временной тепловой сборочный зазор для качественной реализации сборки соединений с натягом, теплоемкость материалов сопрягаемых деталей c_a и c_b , удельную плотность их материалов ρ_a и ρ_b , объемы охватывающей и охватываемой деталей V_a и V_b , коэффициенты линейного расширения и сжатия материалов сопрягаемых деталей α_p и α_b , скрытую теплоту E_N испарения жидкого азота, при погружении детали в ванну, себестоимость 1-го кВт·часа электрической энергии $w_э$, себестоимость 1кг массы жидкого азота w_N , КПД нагревателя $\eta_э$, коэффициент мощности $\cos\beta$ можно установить коэффициент K соотношения затрат на нагрев охватывающих деталей и на охлаждение охватываемых

$$K = \frac{\Delta d_a \cdot w_э \cdot \alpha_{сж} \cdot V_a \cdot E_N \cdot \rho_a}{\Delta d_b \cdot w_N \cdot \alpha_p \cdot V_b \cdot \eta_э \cdot \cos\beta \cdot \rho_b} \quad (2)$$

Если коэффициент затрат будет превышать 1, то целесообразно при сборке больше охлаждать охватываемую деталь, а если же он ниже 1, то целесообразно больше нагревать охватывающую деталь. Наиболее оптимальным КТСС будет технологический процесс с равно затратной технологией с коэффициентом $K = 1$.

Зная входные в зависимость (2) параметры можно просчитать значения коэффициента $k_{\Delta d}$ и определиться с вариантом рациональной технологии КТСС.

При этом для обеспечения качественной сборки соединений с временным зазором отношение необходимого увеличения посадочного диаметра охватывающей детали к его уменьшению для охватываемой будет

$$k_{\Delta d} = \frac{\Delta d_a}{\Delta d_b} = \frac{w_N \cdot \alpha_p \cdot V_b \cdot \eta_э \cdot \cos\beta \cdot \rho_b \cdot c_b}{w_э \cdot \alpha_{сж} \cdot V_a \cdot E_N \cdot \rho_a \cdot c_a}. \quad (3)$$

Определив из зависимости (3) коэффициент соотношения $k_{\Delta d}$, решаем задачу по разработке зависимостей для определения необходимых значений Δd_a и Δd_b , температурных уровней и температур неравномерного нагрева и неравномерного охлаждения сопрягаемых деталей для получения величин Δd_a и Δd_b с учетом направления подвода тепла и холода. По полученным значениям температур неравномерного нагрева и неравномерного охлаждения сопрягаемых деталей определим затраты времени на выполнение технологических операций.

С учетом (3) и выбрав значение коэффициента $k_{\Delta d}$, получим зависимость для определения, например, необходимого уменьшения посадочного диаметра охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении Δd_g

$$\Delta d_b = \frac{(1 + k_{сб}) N_{\max}}{1 + k_{\Delta d}}, \quad (4)$$

где $k_{сб}$ – коэффициент условий реализации сборки соединений с натягом, который принимается в интервале 0,1 – 0,34.

Зная уменьшение посадочного диаметра Δd_b охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении можно определить увеличение посадочного диаметра охватываемой детали при ее нагревании Δd_a

$$\Delta d_a = \Delta d_\Sigma - \Delta d_b. \quad (5)$$

Таким образом использование зависимостей (1) – (5) позволит с учетом сокращения энергетических затрат осуществлять выбор следующих технологических параметров КТСС: необходимых значений Δd_a и Δd_b , температурных уровней и температур неравномерного нагрева и неравномерного охлаждения сопрягаемых деталей для получения величин Δd_a и Δd_b с учетом направления подвода тепла и холода, затрат времени на выполнение технологических операций.

Следует при этом отметить, что для решения задачи проектирования технологии КТСС с учетом энергосбережения обязательным также условием должно быть согласование по времени всех технологических операций на промежутке от начала совмещения деталей с временным зазором до начала нагрева охватываемой детали и низкотемпературного охлаждения охватываемой. При этом установлено, что возможны различные варианты сборки.

Если предположить, что структура временных затрат выбрана с учетом минимизации потерь тепла и холода деталями, то далее очень важно определиться с характером запаса ими энергии, полученной при их неравномерном нагреве и неравномерном охлаждении, и законом распределения в них температуры.

Примем, что КТСС соединений с натягом выбран с учетом минимизации временных затрат и тепловых потерь (например, проводится в автоматизированном цикле), нагрев и охлаждение обеих деталей или одной из них осуществляется неравномерно, а выдержка после термовоздействия не происходит.

В этом случае в обеих деталях или одной из них будет сохраняться характер неравномерного распределения температуры, который они приобрели в процессе термовоздействия над ними.

На основании анализа и синтеза известных технологий сборки установлено, что при выполнении технологических операций термовоздействия на детали при КТСС возможны 36 основных вариантов распределения температуры в толстостенных и тонкостенных деталях с учетом направления подвода к ним тепла или холода.

Для оперативного применения предложенной методики расчета при проектировании рациональной энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом КТСС разработан новый графоаналитические способы.

На основании выполненных те разработаны графоаналитические способы, позволяющие при проектировании оперативно определять рациональные технологические параметры реализации технологии формирования соединений с натягом способом КТСС. Предлагаемые графоаналитические способы созданы с учетом технологических параметров, которые гарантируют прочность соединений с натягом и условия осуществления их бесконтактной сборки при вертикальной и горизонтальной схемах ориентирования деталей.

Для оперативного применения методики расчета при проектировании рациональной энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом КТСС разработан с использованием программного комплекса MatCAD новый графоаналитический способ, который представляет две номограммы (рис. 1 и 2). Способ позволяет определить рациональное соотношение необходимого увеличения посадочного диаметра охватываемой детали при ее нагреве и уменьшения для охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении. Полученные номограммы разработаны на основе аналитического решения зависимости (3).

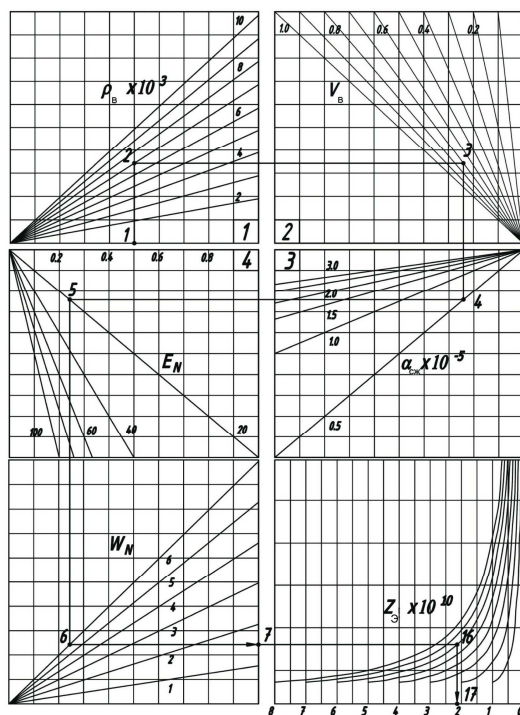
На рис. 1 представлена номограмма для определения параметра $Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающей детали, а на рис. 2 – номограмма для определения параметра $Z_b = Z_o \cdot \Delta d_b / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при охлаждении охватываемой детали и коэффициента $k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$ соотношения изменения диаметра посадки при нагреве охватывающих деталей Δd_a и при низкотемпературном охлаждении охватываемых Δd_b .

Номограмма (рис. 1) включает 6 квадрантов. По оси абсцисс 1-го квадранта отложены значения теплоемкости материала охватываемой детали C_e , а на его лучах значения удельной плотности ρ_e , на лучах во 2-м квадранте – значение объема V_e охватываемой детали, на лучах в 3-м квадранте – значение коэффициента линейного сжатия материала, на лучах в 4-м квадранте – значение скрытой теплоты E_N испарения жидкого азота при погружении детали в ванну, на лучах в 5-м квадранте – значение себестоимости 1-го кг жидкого азота, на лучах в 6-м квадранте отложены значения параметра $Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающей детали, которые будут определяться по номограмме, представленной на рис. 2. По оси абсцисс 6-го квадранта также отложена шкала определяемого значения коэффициента $k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$ соотношения изменения диаметра посадки при нагреве охватывающих деталей Δd_a и при низкотемпературном охлаждении охватываемых Δd_b . Номограмма (рис. 2) включает 6 квадрантов. По оси абсцисс 1-го квадранта отложены значения теплоемкости материала охватывающей детали C_a , а на его лучах значения удельной плотности ρ_a , на лучах во 2-м квадранте – значение объема V_a охватывающей детали, на лучах в 3-м квадранте – значение коэффициента линейного сжатия материала α_e , на лучах в 4-м квадранте – значение КПД нагревателя η_j , на лучах в 5-м квадранте – значение коэффициента мощности $\cos \beta$, на лучах в 6-м квадранте отложены значения себестоимости 1 кВт.час электрической энергии на нагрев охватывающей детали, по оси абсцисс 6-го квадранта также отложена шкала определяемого значения параметра $Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающих деталей.

Решение задачи по определению коэффициента относительных затрат на нагрев охватывающих деталей и низкотемпературное охлаждение охватываемых деталей, а также отношение необходимого увеличения посадочного диаметра охватывающей детали к его уменьшению для охватываемой следует проводить в следующей последовательности.

Вначале по номограмме (рис. 2.) по оси абсцисс 1-го квадранта находим значения теплоемкости C_a материала охватывающей детали (т.8), с которой проводим перпендикуляр до пересечения с лучом (т.9) для заданного значения удельной плотности ρ_a . Затем с т.2 проводим горизонталь во 2-й квадрант до пересечения с лучом (т.10), соответствующим значению объема V_a охватывающей детали. Далее с т.10 проводим вертикаль вниз в 3-й квадрант до пересечения с лучом (т.11), соответствующим значению коэффициента линейного расширения α_p материала. С т.11

проводим горизонталь в 6-й квадрант до пересечения с лучом (т.12), соответствующим η , значению кпд нагревателя.



$$k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$$

Рис. 1. Номограмма для определения параметров

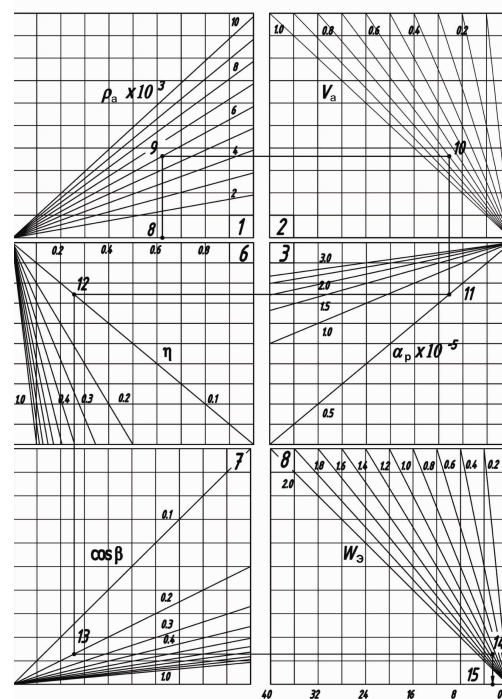
$$Z_b = Z_o \cdot \Delta d_b / d \cdot 10^3 \text{ [грн/мм]}$$

$$i k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$$

Rys. 1. Nomogram dla wyznaczenia parametrów

$$Z_b = Z_o \cdot \Delta d_b / d \cdot 10^3 \text{ [°C/mm]}$$

$$i k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$$



$$Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$$

Рис. 2. Номограмма для определения параметра $Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающей детали

Rys. 2. Nomogram dla wyznaczenia parametrów

$$Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3 \text{ [°C/mm]} \text{ przy nagrzewaniu części obejmującej}$$

С т.12 проводим вертикаль в 7-й квадрант до пересечения с лучом (т.13), соответствующим значению коэффициента мощности $\cos \beta$. С т.13 проводим горизонталь в 8-й квадрант до пересечения с лучом (т.14), соответствующим значению себестоимости W_g 1 кВт.час электрической энергии. Проведя с т. 14 вертикаль вниз до абсциссы квадранта (т.15) определим значение параметра $Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающих деталей. Затем переходим к номограмме, представленной на рис. 1. Вначале по оси абсцисс 1-го квадранта находим значения

теплоемкости материала охватываемой детали C_g (т.1), с которой проводим перпендикуляр до пересечения с лучом (т.2) для заданного значения удельной плотности ρ_g . Затем с т.2 проводим горизонталь во 2-й квадрант до пересечения с лучом (т.3), соответствующим значению объема V_g охватываемой детали. Далее с т.3 проводим вертикаль вниз в 3-й квадрант до пересечения с лучом (т.4), соответствующим значению коэффициента линейного сжатия α_g материала. С т.4 проводим горизонталь в 4-й квадрант до пересечения с лучом (т.5), соответствующим значению скрытой теплоты E_N испарения жидкого азота при погружении детали в ванну. С т.5 проводим вертикаль в 5-й квадрант до пересечения с лучом (т.6), соответствующим значению себестоимости 1 кг жидкого азота. По ординате квадранта (т.7) определим значение параметра $Z_b = Z_o \cdot \Delta d_b / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при охлаждении охватываемой детали. Затем с учетом полученного значения параметра $Z_a = Z_o \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ определим коэффициент $k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$ соотношения изменения диаметра посадки при нагреве охватывающих деталей Δd_a и при низкотемпературном охлаждении охватываемых Δd_b . Для этого вначале с т. 7 проведем горизонталь в квадрант 9 до пересечения с лучом (т.16), соответствующим значению определенного параметра $Z_a = Z_o \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$, а затем с т. 16 проводим вертикаль вниз до оси абсцисс (т.17) и находим значение $k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$ соотношения изменения диаметра посадки при нагреве охватывающих деталей Δd_a и при низкотемпературном охлаждении охватываемых Δd_b .

ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование разработанной методологии позволяет с достаточной для технологии машиностроения точностью с учетом сокращения энергетических затрат производить выбор оптимальных параметров технологии формирования соединений с натягом комбинированным термическим способом сборки (КТСС).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборский И. Л. Определение параметров энергосбережения при сборке соединений с натягом КТСС // "Современные проблемы подготовительного производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте". 22–26 февраля 2010 г. Сб.: – К., Материалы 10-го международного научно-технического семинара, 26 – 28 февраля 2010 г., г. Свалява: – К.: АТМ Украины, 2010. – С.194 – 197.
2. Оборский И.Л. Технологическое обеспечение сборки соединений с натягом комбинированным термическим способом. // "Современные проблемы подготовительного производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте". 26–28 февраля 2008 г. Сб.: – К., Материалы 8-го международного научно-технического семинара, 26 – 28 февраля 2008 г., г. Свалява: – К.: АТМ Украины, 2008. –С. 190 – 192.

3. Оборский И.Л. Выбор условий для качественной реализации процесса формирования соединений деталей с натягом КТСС.// "Человек–технологии–среда. Теория и практика". 15 – 19 сентября 2009 г. Сб.: Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции, 15 – 19 сентября 2009 г., г. Судак, Украина. – 2009. – С. 83 – 85.

DESIGN OF THE RATIONAL ENERGY-SAVING TECHNOLOGY OF ASSEMBLING CONNECTIONS WITH THE INTERFERENCE, ACHIEVED BY THE THERMAL METHODS

***Abstract.** On the basis executed theoretical and experimental studies are developed dependences and is created methodology, that make it possible to determine the rational assembly-line parameters and to develop the rational structures of the technological process of assembling, which ensures energy-economy with KTSS.*

Ivan OBORSKIY
Aleksandr DEMKOWSKIY
Nina OBORSKA
Dmitrij CHOMENKO
Kijowski Uniwersytet
Technologii i Projektowania
Kijów, Ukraina

WYZNACZANIE PARAMETRÓW KONSTRUKCYNO-TECHNOLOGICZNYCH I PROJEKTOWANIE RACJONALNEJ TECHNOLOGII MONTAŻU POŁĄCZEŃ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

ВВЕДЕНИЕ

Для выбора рациональной структуры технологического процесса, обеспечивающего прочностные характеристики, необходимо установить множество входных факторов [1-3]. Основным из них следует отнести: условия эксплуатации соединения; конструктивные размеры соединяемых деталей (диаметр посадки, длина сопряжения, толщина стенок деталей); физико-механические свойства используемых материалов (коэффициенты линейного расширения и сжатия, удельная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент теплопередачи, механические характеристики материалов деталей и промежуточных прослоек в зоне контакта); предельно допустимые уровни температур нагрева и охлаждения при КТСС; условия отверждения клеевой прослойки. Следует также отметить, что существенное и, зачастую, определяющее влияние на характеристики прочности цилиндрических соединений с натягом оказывает технологическая подготовка сопрягаемых поверхностей сопрягаемых деталей. В докладе приводятся технологические методы качественной подготовки сопрягаемых поверхностей охватываемых деталей нанесением регулярного микрорельефа и сборки соединений с натягом. При известных выше параметрах и условиях определены рациональные методы формирования посадок деталей. Для решения этой задачи выполнен выбор параметров соединений для заданной их прочности и применительно к исследуемым методам их формирования. С этой целью разработано соответствующее программное обеспечение по определению параметров сборки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации задачи вычисления оптимальных параметров и способа сборки соединений с натягом создан программный комплекс, позволяющий определять технологические сборочные параметры для разных способов сборки, а именно:

- с нагревом охватывающей детали;
- с низкотемпературным охлаждением охватываемых деталей;
- с низкотемпературным охлаждением охватываемых деталей и с нагревом охватывающей;
- с нагревом охватывающей и гальваническим покрытием;
- с низкотемпературным охлаждением охватываемых деталей и гальваническим покрытием;
- с низкотемпературным охлаждением, нагревом и гальваническим покрытием;
- с нагревом охватывающей детали и клеем;
- с нагревом, охлаждением и клеем.

Для работы программного комплекса создана база данных значений констант, свойств материалов деталей, конструктивных и технологических параметров, влияющих на прочность посадок с натягом. На рис.1 представлена структурная схема программного комплекса выбора метода сборки высокопрочных малонапряженных соединений с натягом.

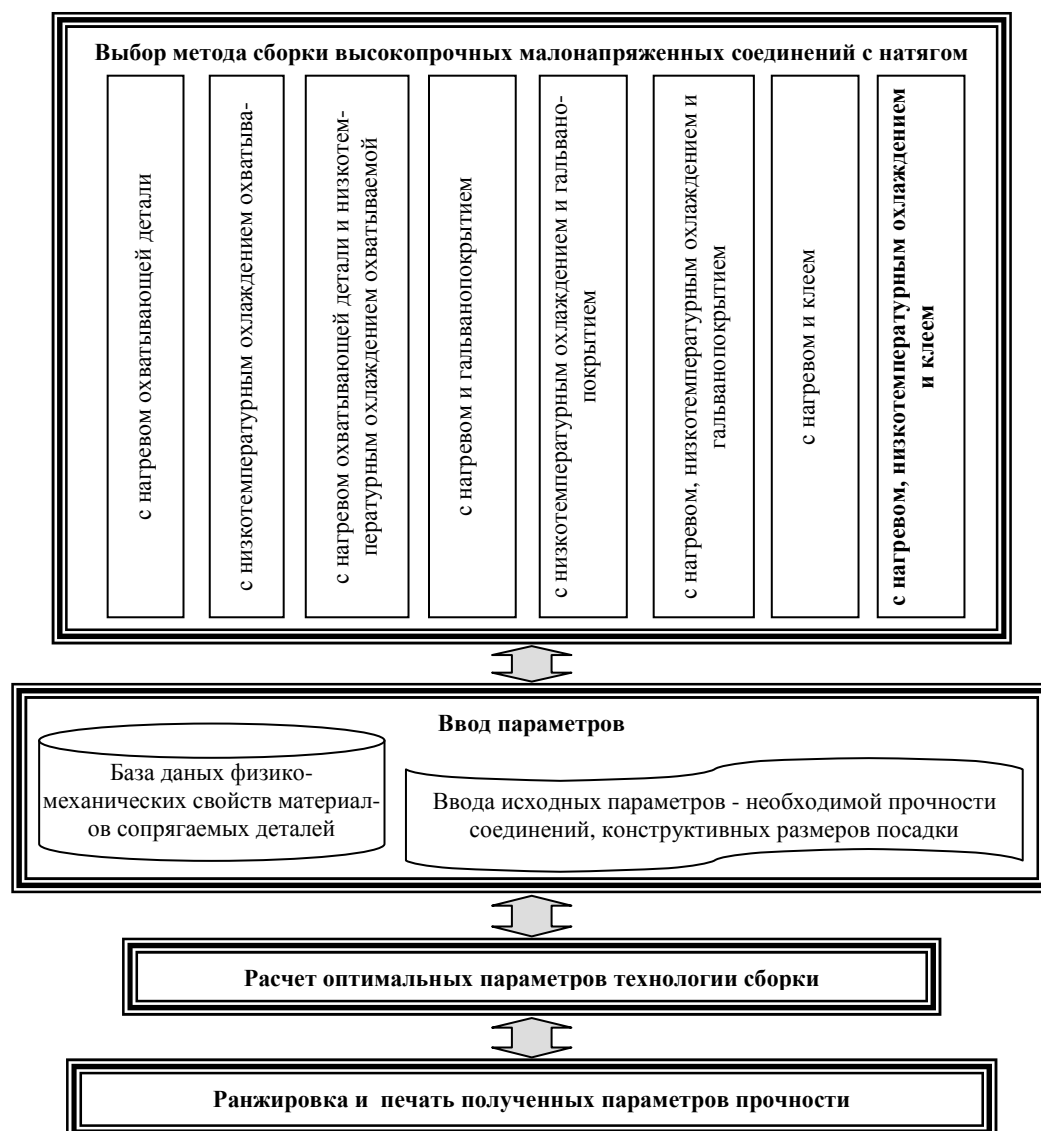


Рис.1. Структурная схема программного комплекса выбора метода сборки высокопрочных малонапряженных соединений с натягом

Rys. 1. Strukturalny schemat systemu oprogramowań dla wyboru sposobu montażu wytrzymałych i z małymi naprężeniami połączeń wciskanych

Установлено, что для формирования соединений с натягом целесообразно использовать следующие способы: 1 – с нагревом охватывающей детали; 2 – с низкотемпературным охлаждением охватываемой детали; 3 – КТСС; 4 – с нагревом и гальванопокрытием; 5 – с низкотемпературным охлаждением и гальванопокрытием; 6 – с нагревом, низкотемпературным охлаждением и гальванопокрытием; 7 – с нагревом и клеем; 8 – КТСС и с клеем.

Сущность методологии выбора технологических параметров сборки различными способами заключается в следующем.

Решение поставленной задачи сводится с ввода исходных параметров: необходимой прочности P соединений, конструктивных размеров (диаметра наружного охватывающей детали, посадки и внутреннего отверстия охватываемой детали), длины посадки, физико-механических свойств материалов сопрягаемых деталей, клеевых композиций и гальванических покрытий.

После ввода данных проводится расчет оптимальных параметров технологии сборки.

Следует отметить, что существенное влияние на прочность посадок оказывают параметры микрорельефа в зоне контакта деталей, особенно параметры регулярного микрорельефа. Для выбора таких параметров предлагается методика и новый графоаналитический способ, включающий специально созданные номограммы (рис. 2 – 4). По первой номограмме (рис. 2) можно определить прочность соединения с натягом, формируемых способом КТСС, с учетом конструктивных параметров соединений, физико-механических характеристик материалов и промежуточных параметров технологии подготовки сопрягаемых поверхностей охватываемых деталей. Вторая номограмма (рис. 3) предназначена для определения промежуточных параметров прочности соединений с натягом при КТСС с учетом технологии подготовки сопрягаемых поверхностей охватываемых деталей нанесением на их сопрягаемую поверхность специальной топологии регулярного микрорельефа. По третьей номограмме (рис. 4) представлена возможность окончательно определить параметры топологии регулярного микрорельефа для обеспечения прочности соединений с натягом при их сборке способом КТСС с учетом конструктивных параметров соединений и физико-механических характеристик материалов сопрягаемых деталей. Номограмма (рис. 2) состоит с 6-ти квадрантов. На абсциссе 1-го квадранта отложены значения посадочных диаметров d в мм. Кривые первого квадранта соответствуют значениям $m = d_2 / d_1$ отношения наружного диаметра d_2 охватывающей детали и внутреннего диаметра d_1 охватываемой. Во втором и третьем квадрантах нанесены наклонные линии, соответствующие соответственно значениям длины L посадки (соединения с натягом) в мм и модуля упругости E для материала деталей в единицах МПа. В четвертом квадранте нанесена наклонная линия, учитывающая частное $\pi^2 / 96$ от отношения квадрата числа $\pi = 3,14$. В пятом квадранте нанесены наклонные лучи, соответствующие произведению πd (мм) числа $\pi = 3,14$ на диаметр посадки d в мм. В пятом квадранте нанесены наклонные, соответствующие части $X = x \cdot 2$ (мм) длины L соединения, выполненной без регулярного микрорельефа на сопрягаемой поверхности охватываемой детали. На оси абсцисс шестого квадранта отложены значения прочности соединения P_t (кН) со стороны торцов, то есть на двух участках X , где нет регулярного микрорельефа.

Вторая номограмма (рис. 3) состоит с 4-х квадрантов. На оси абсцисс седьмого квадранта отложены значения прочности соединения P_t (кН) со стороны торцов, в самом квадранте нанесены наклонные линии, соответствующие прочности P_c соединения в средней части на длине $L-2x$ с регулярным микрорельефом.

В квадранте 8 нанесены лучи, соответствующие значениям произведения πd в мм, а в квадранте 9 наклонные линии, соответствующие соответственно значениям длины L_c посадки (соединения с натягом) в мм в средней части на длине $L-2x$ с регулярным микрорельефом. В квадранте 10 нанесены лучи, соответствующие значениям напряжений при сдвиге τ_a для материала охватывающей детали в единицах МПа. Третья номограмма (рис. 4) состоит с 4-х квадрантов.

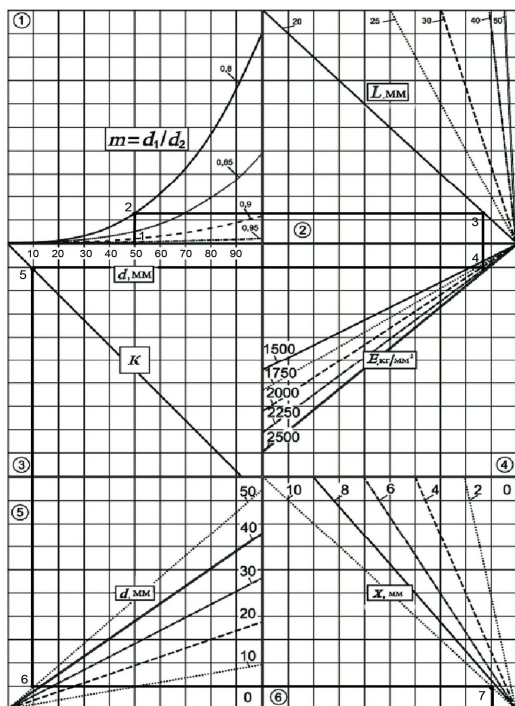


Рис. 2. Номограмма для определения прочности соединения с натягом с учетом конструктивных параметров соединений, физико-механических характеристик материалов

Rys. 2. Nomogram dla wyznaczenia wytrzymałości połączenia wciskanego z uwzględnieniem konstrukcyjnych parametrów połączenia oraz fizyko-mechanicznych właściwości materiałów

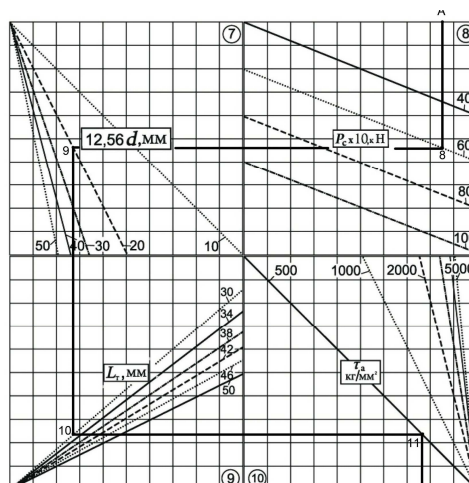


Рис. 3. Номограмма для определения промежуточных параметров прочности соединений с натягом при КТЦС.

Rys. 3. Nomogram dla wyznaczenia pośrednich parametrów wytrzymałości połączeń wciskanych sposobem termicznym

В двенадцатом квадранте нанесены наклонные линии, соответствующие шагу S (мм) выполнения регулярного микрорельефа, а в квадранте 13 – лучи, соответствующие значениям тангенса $\tan \alpha$ угла профиля микрорельефа при его вершине. В квадранте 14 нанесены наклонные параллельные линии, соответствующие значениям в мм произведения контактного давления p_N на параметр A .

На оси абсцисс квадранта 14 отложены значения высоты регулярного микрорельефа R_b (мм).

Примем конструктивные параметры соединения и деталей: диаметр посадки d , отношение наружного диаметра d_2 охватываемой детали и внутреннего диаметра d_1 охватываемой равным $m = d_2 / d_1 = 2$, длину посадки L , модуль упругости, число $\pi = 3,14$, длины соединения по торцам $X = L \cdot 2$ и нанесения регулярного микрорельефа на поверхность охватываемой детали $L_c = L - X$, заданную прочность соединения P_c , напряжения среза микрорельефа при сдвиге для материала охватываемой детали τ_a и охватываемой τ_b , шаг нанесения микрорельефа на сопрягаемую

поверхность охватываемой детали S , углы α при вершине и наклона стороны $\beta_y = 85-90^\circ$, стороны воспринимающей нагрузку, и контактное давление p_N , создаваемое сборочным натягом.

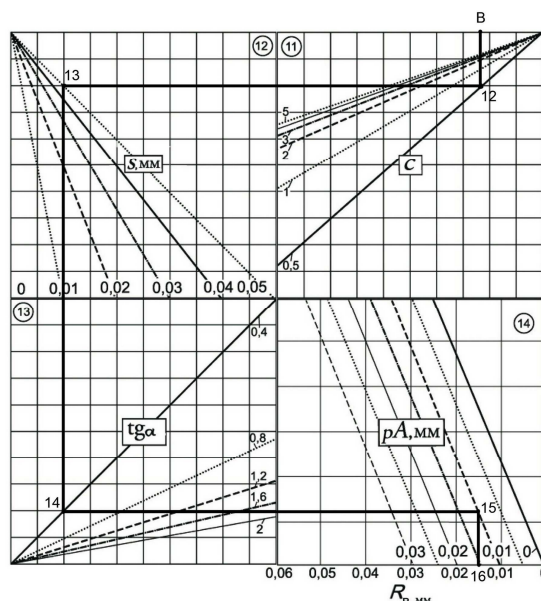


Рис. 4. Номограмма для определения параметров технологии подготовки сопрягаемых поверхностей охватываемых деталей для обеспечения заданной повышенной прочности соединений с натягом при КТСС

Rys. 4. Nomogram dla wyznaczenia parametrów technologii przygotowania złączanych powierzchni części obejmujących celem zapewnienia zadanej podwyższonej wytrzymałości połączeń wciskanych sposobem termicznym

Рассмотрим решение задачи применительно к соединению деталей, изготовленных, например, из стали 45. Последовательность решения следующая. Примем конструктивные параметры соединения и деталей: диаметр посадки d , отношение наружного диаметра d_2 охватывающей детали и внутреннего диаметра d_1 охватываемой равным $m = d_2 / d_1 = 2$, длину посадки L , модуль упругости Юнга, число $\pi = 3,14$, длины соединения по торцам $X = x \cdot 2$ и нанесения регулярного микрорельефа на поверхность охватываемой детали $L_c = L - X$, заданную прочность соединения P_c , напряжения среза микрорельефа при сдвиге для материала охватывающей детали τ_a и охватываемой τ_b , шаг нанесения микрорельефа на сопрягаемую поверхность охватываемой детали S , углы α при вершине и наклона стороны $\beta_y = 85-90^\circ$, стороны воспринимающей нагрузку, и контактное давление p_N , создаваемое сборочным натягом.

Затем рассматриваем номограмму на рис. 2. С т.1 (квадрант 1), соответствующей выбранному диаметру посадки $d=50$ мм проводим вертикаль вверх до пересечения с кривой в т.2, соответствующей отношению наружного диаметра d_2 охватывающей детали и внутреннему d_1 равным $m = d_2 / d_1 = 2$. С т.2 проводим горизонталь во второй квадрант до пересечения в т.3

с кривой, соответствующей длине посадки $L=200$ мм, а с т.3 опускаем вертикаль вниз в квадрант 3 до пересечения в т.4 с наклонной, соответствующей модулю упругости Юнга для материалов деталей $E = 2,2 \times 10^4$ МПа. Далее с т.4 проводим горизонталь в квадрант 4 до пересечения в т.5 с наклонной, соответствующей отношению $\pi^2/96$. С т.5 опускаем вертикаль вниз в квадрант 5 до пересечения в т.6 с наклонной, соответствующей диаметру посадки 50 мм. С т.6 проводим горизонталь в 6 квадрант до пересечения в т.7 с наклонной, соответствующей длине соединения со стороны торцов без регулярного микрорельефа на поверхности охватываемой детали $X = 10$ мм. С т.7 проводим вертикаль до пересечения с абсциссой квадранта 6 (т. А), соответствующей прочности соединения по торцам при заданном контактном давлении. Затем переходим к номограмме (рис. 3). С точки А ставим перпендикуляр к наклонной, соответствующей заданной прочности соединения $P_c = 600$ кН (т.8). Далее зная параметры $12,56d$ (т.9) и L_t (т.10), напряжения среза $\tau_a = 500$ МПа (т.11) при сдвиге для материала охватывающей детали, находим на абсциссе квадранта 10 т.В. Переходим к номограмме, представленной на рис. 4. С точки В опускаем перпендикуляр до пересечения в т. 12 с наклонной, соответствующей параметру C (отношение напряжения среза τ_b охватывающей детали к напряжению среза τ_a охватываемой детали). Далее задавшись из практики шагом S (т.13) нанесения регулярного микрорельефа, углами α ($\tan \alpha$ т.14) при вершине и $\beta_y = 85-90^\circ$ наклона стороны, воспринимающей осевую нагрузку, к его основанию, параметр $pA=15$ (т.15), определяющий взаимосвязь влияния контактного давления (натяг принят 50 мкм) и геометрических параметров соединения), находим по оси абсцисс (т.16) высоту $R_b = 15$ мкм.). Параметр pA (квадрант 14, рис. 5.11) определяется расчетным методом по зависимости (3.38) с учетом принятого контактного давления p для сборки соединения с натягом. Для расчета параметров, обеспечивающих прочность соединений с натягом, и выбора рациональной технологии их формирования разработан алгоритм и программа для персонального компьютера.

Выводы: Приведенные структура применяемых способов сборки соединений с натягом, алгоритм и графоаналитический способ позволяют обеспечивать выбор рациональных конструктивно-технологических параметров соединений с натягом с учетом условий эксплуатации, физико-механических свойств используемых материалов, микрорельефа и промежуточных прослоек в зоне контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборский И.Л. Технологические основы сборки соединений с натягом термическими способами с использованием регулярного микрорельефа в зоне контакта // ZESZYTY NAUKOWE Politechniki Rzeszowskiej 261. MECHANIKA z. 76. Modułowe technologie i konstrukcje w budowie maszyn. – Rzeszow (Польша). – 2009. – С. 229 – 234.
2. Оборский И.Л. Технологическое обеспечение качества соединений с натягом, формируемых КТСС с использованием регулярного микрорельефа в зоне контакта деталей // Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr. 273. Mechanika, z. 79. Polaczenia montazowe. Rzeszow 2010 (Польша). – С. 115 – 120.
3. Патент України на корисну модель № 41759, МПК(2009) B23P19/02, B23P11/02. Спосіб з'єднання деталей, що охоплюють одна одну. Оборський І. Л., Ляшенко Б.А., Зенкін А.С., Шалай В.О. – №u200814207; Заявлено 10.12.2008; Опубл. 10.06.2009. Бюл. №11.
4. Оборский И.Л. Выбор технологических параметров рациональной энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом, осуществляемой термическими способами. // Сб.: Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции "Качество технологий–качество жизни". 15 – 19 сентября 2010, г. Судак, Украина. – 2010. – С. 74 – 76.

**DETERMINATION OF THE CONSTRUCTION-ENGINEERING PARAMETERS
OF CONNECTIONS WITH THE INTERFERENCE AND THE DESIGN OF THE RATIONAL
TECHNOLOGY OF ASSEMBLING**

***Abstract.** Is given the structure of the methods of assembling connections with the interference used and the algorithm of solution of problem by the selection of their rational construction-engineering parameters taking into account the operating conditions, physicomachanical properties of the utilized materials, microrelief and intermediate layers in the contact zone.*

Leonid A. RABINOVICH

Maria V. POLYAKOVA

Wołogradzki Państwowy

Uniwersytet Techniczny

Wołograd, Rosja

OPTIMALIZACJA PRECYZYJNEGO MONTAŻU PRZY NIEPEŁNEJ ZAMIENNOŚCI CZĘŚCI W POŁĄCZENIACH

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ СБОРКИ ПРИ НЕПОЛНОЙ ВЗАИМОЗАМЕ- НЯЕМОСТИ ДЕТАЛЕЙ В СОЕДИНЕНИЯХ

В машино- и приборостроении прецизионное производство отличается особой технологической сложностью. Это относится, в том числе, и к сборочным технологиям, строящимся, как правило, на принципах групповой взаимозаменяемости и требующих для образования сборочного комплекта выполнения процедур размерного подбора деталей.

Необходимость размерного комплектования деталей приводит к образованию недоукомплектованных изделий, называемому незавершенным производством. Его объем зависит от степени неидентичности распределений размеров сопрягаемых поверхностей и достигает значений, соизмеримых с объемами собираемой продукции.

Вместе с тем, незавершенное производство может быть существенно уменьшено соответствующей организацией размерной обработки сопрягаемых поверхностей. Рассмотрим, как это можно сделать для сборки с групповой взаимозаменяемостью гладких цилиндрических соединений.

Цилиндрические поверхности прецизионной пары, имея одинаковый номинальный размер, обрабатываются с неодинаковой точностью: вал изготавливается точнее отверстия на один или даже два квалитета [1]. Чтобы при этом в сборке участвовали все детали, изготовленные в пределах назначенных допусков, групповые допуски у отверстий $\Delta_A^{гр}$ будут протяженнее групповых допусков вала $\Delta_B^{гр}$ в отношении:

$$\Delta_A^{гр} = \frac{\delta_A}{\delta_B} \cdot \Delta_B^{гр},$$

где δ_A и δ_B - поля допусков у диаметров сопрягаемых поверхностей отверстия и вала. В этом случае незавершенного производства не возникает, но точность соединений, образованных из одноименных групп деталей будет неодинаковой и будет выходить за допустимые пределы, т.е. появится дополнительная доля бракованных единиц, тем большая, чем выше требования точности сборки [2].

Чтобы не допустить появления брака из-за неодинаковых групповых допусков, более точно обрабатываемые детали соединения – валы, должны изготавливаться в пределах всего допуска менее точно обрабатываемых деталей – отверстий, т.е. сопрягаемые поверхности валов следует обрабатывать, производя размерную перенастройку оборудования. При этом партия изготавливаемых с несколькими k размерными перенастройками валов по распределению размеров должна «подгоняться» под распределение размеров отверстий.

Метод прецизионной сборки подгонкой известен в машиностроении для соединений с индивидуальной взаимозаменяемостью деталей, и в случае автоматизации называется сопряженной обработкой. Поэтому будем называть такую технологию изготовления деталей для последующей сборки с групповой взаимозаменяемостью **сопряженной обработкой партий деталей**.

Поясним назначение сопряженной обработки партий деталей показанными на рис. 1 распределениями размеров сопрягаемых поверхностей отверстий $f_A(x)$ и валов $f_B(x)$, изготавливаемых на k настроечных размерах D_{Hj} ($j = \overline{1, k}$), назначенных определенным образом относительно номинального диаметра $D_{ном}$ соединения.

Очевидно, что в каждую i -ую ($i = \overline{1, r}$) размерную группу валы будут изготавливаться от каждого из настроечных размеров в количествах, определяемых площадью под кривыми $f_B(x)$, ограниченной пределами i -ой размерной группы. Поэтому количество валов, изготавливаемых для i -ой размерной группы, суммируются по формуле:

$$\left\{ \frac{n_{Bi}}{N_A} = \sum_{j=1}^k g_j \cdot \left[F\left(\frac{BG_i - D_{Hj}}{\sigma_B} \right) - F\left(\frac{HG_i - D_{Hj}}{\sigma_B} \right) \right] \right\}, (i = \overline{1, r}), \quad (1)$$

где n_{Bi} – относительно количество валов в i -ой размерной группе; N_A – количество отверстий в партии деталей, поступивших на сборку прецизионного соединения; g_j – относительное количество валов, изготавливаемых на j -ой настройке; σ_B – среднее квадратическое отклонение распределения точности изготовления валов; HG_i и BG_i – соответственно нижняя и верхняя границы i -ой размерной группы валов; $F(z)$ – функция Лапласа.

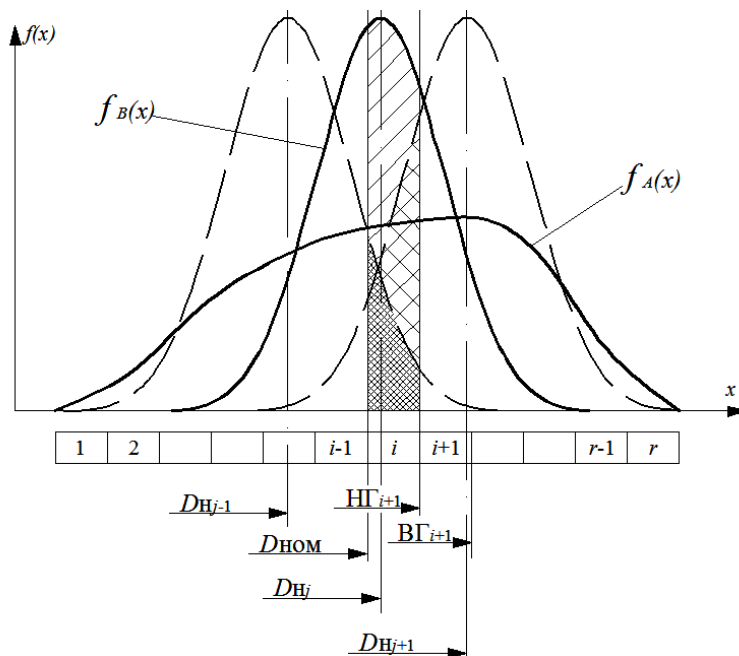


Рис. 1 Распределения размеров сопрягаемых поверхностей прецизионной пары

Rys. 1. Rozkłady wymiarów łączonych powierzchni precyzyjnego połączenia

В выражении (1) значения k , D_{Hj} и g_j можно установить следующим образом: принимается значение k и назначаются D_{Hj} ($j = \overline{1, k}$) и тогда из системы уравнений (1) берется k уравнений и рассчитываются величины g_j , задающие количественную программу изготовления валов на каждой настройке оборудования.

Для данного решения следует оговорить следующие условия. В уравнениях (1) количеству отверстий в селективных группах приравнивается сумма количеств валов с соответствующих настроек, попадающих в данную селективную группу. Поэтому число уравнений в системе (1) равно числу r селективных групп отверстий. Количество же перенастроек $k \ll r$. Таким образом возникает неопределенность в выборе условий для решения g_j . Однако, так как целью решения g_j является достижение минимума незавершенного производства, то и значение g_j следует выбрать из ряда возможных решений по образованию минимума незавершенного производства. Такой расчет можно произвести, например, в пакете *MathCAD*, где для приближенного решения системы уравнений предусмотрена функция *Minerr*, которая минимизирует невязку системы уравнений. Количество k настроечных размеров устанавливается таким, при котором незавершенное производство будет уменьшено до практически допустимого объема. С другой стороны, число перенастроек следует сделать наименьшим. Поэтому начальное значение k принимается равным двум.

Значения D_{Hj} устанавливаются в пределах допусков наиболее насыщенных размерных групп парных деталей так, чтобы при настройке на размер валы обрабатывались пропорционально для двух смежных наиболее многочисленных групп отверстий. То есть со сдвигом δ_j , относительно границы допуска между выбранными группами отверстий, в сторону большей по численности группы (рис. 2) при котором будет удовлетворяться условие:

$$\frac{n_{A_{i+1}}}{n_{A_i}} = \frac{F\left(\frac{\Delta_B^{\text{гп}}}{\sigma_B}\right) + F\left(\frac{\delta_j}{\sigma_B}\right)}{F\left(\frac{\Delta_B^{\text{гп}}}{\sigma_B}\right) - F\left(\frac{\delta_j}{\sigma_B}\right)},$$

откуда:

$$F\left(\frac{\delta_j}{\sigma_B}\right) = \frac{n_{A_{i+1}} - n_{A_i}}{n_{A_{i+1}} + n_{A_i}} \cdot F\left(\frac{\Delta_B^{\text{гп}}}{\sigma_B}\right), \quad (2)$$

где $\Delta_B^{\text{гп}}$ - протяженность группового допуска в размерной группе валов; $\Delta_B^{\text{гп}} = \Delta_A^{\text{гп}}$. Тогда значение очередного настроечного размера D_{Hj} будет:

$$D_{Hj} = \text{ВГ}_i \pm \delta_j, \text{ или } D_{Hj} = D + \xi_j, \quad (3)$$

где ξ_j - величина, корректирующая настроечный размер, относительно номинального.

Очевидно, что расстояние между двумя смежными значениями настроечных размеров D_{Hj} и D_{Hj+1} должно быть больше либо равно сумме двух значений групповых допусков вала, т.е.

$$D_{Hj+1} - D_{Hj} \geq 2\Delta_B^{\text{гп}}.$$

Номера i и $i+1$ двух размерных групп отверстий могут быть назначены произвольно. Однако в последующих расчетах комбинации выбранных для расчета g_j номеров групп отверстий могут быть изменены и расчеты g_1 и g_2 повторены для оценки правильности полученных результатов.

Теперь при назначенных D_{H1} и D_{H2} и рассчитанных значениях g_1 и g_2 может быть выполнена сортировка валов на селективные группы, вычислены количества некомплектуемых валов и отверстий, т.е. объем незавершенного производства Q при данном варианте настройки для размерной обработки валов. Очевидно, что он уменьшится по сравнению с тем, который образуется

при изготовлении валов для всей партии отверстий при одной размерной настройке оборудования. Логично, однако, попытаться улучшить дополнительно результаты сборки, получаемые для двух настроек. Для этого следует увеличить разность настроечных размеров обработки вала сначала на одну величину Δ_B^{rp} , затем на два Δ_B^{rp} и т.д., и все расчеты повторять до тех пор, пока объем незавершенного производства будет уменьшаться. Рассчитанная таким образом величина незавершенного производства покажет технологическую возможность повысить собираемость прецизионных пар при двух настройках оборудования.

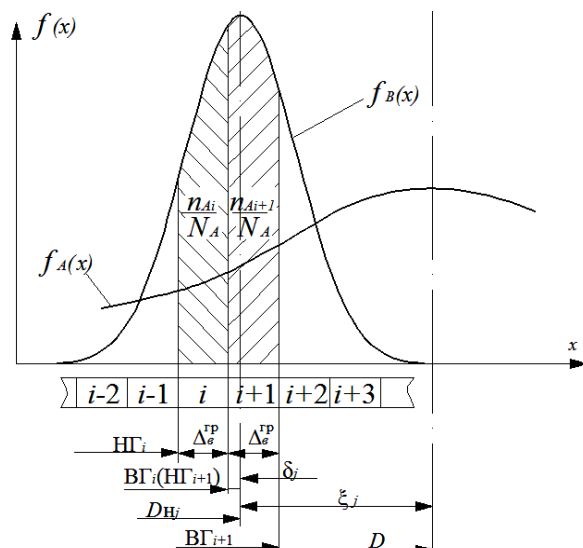


Рис. 2 Схема к расчету D_{Hj}

Rys. 2. Schemat dla obliczenia D_{Hj}

Аналогичные расчеты должны быть продолжены при трех, четырех и т.д. перенастройках D_{Hj} до тех пор, пока объем незавершенного производства не достигнет минимального значения, либо не будет оптимизирован по минимуму затрат на селективное комплектование прецизионных пар. Оптимизация числа k перенастроек может быть решена следующим образом.

Необходимость периодической перенастройки уменьшает производительность при изготовлении валов и связана с дополнительными затратами на усовершенствование технологического оборудования, но с другой стороны, повышает собираемость прецизионных изделий в партиях поступающих на сборку деталей, т.е. улучшает экономические показатели сборочного производства. Компромисс между данными экономическими показателями может быть установлен решением задачи линейного программирования, представленной целевой функцией:

$$L = C1 \cdot k_j + C2 \cdot Q_j \rightarrow \min, \quad (4)$$

при ограничениях:

$$j \leq k; Q_j \leq 1,$$

где $C1$ и $C2$ – ценовые коэффициенты, т.е. стоимости одной перенастройки и одной единицы незавершенной продукции соответственно; k , Q_j , j – как и ранее, число настроечных размеров и вероятность образования некомплектных пар при j настройках оборудования. Решение функции (4) методом перебора всех вариантов покажет, при каком числе перенастроек и объеме

незавершенного производства экономические затраты на изготовление конкретного прецизионного изделия будут наименьшими.

Назовем данное расчетное число перенастроек оптимальным ($k_{\text{опт}}$), а соответствующий ему объем незавершенного производства допустимым ($Q_{\text{доп}}$).

Тогда в описанной выше процедуре расчета числа перенастроек следует заменить цель уменьшения объема незавершенного производства с минимального Q_{min} на допустимый $Q_{\text{доп}}$, оптимизирующий затраты на усложнение оборудования и технологию размерной обработки партий валов.

Применение описанной методики покажем на примере расчета параметров размерной настройки оборудования при изготовлении валов, обрабатываемых с одной установки точнее отверстий на один и два квалитета (рис. 3). Отклонение размеров сопрягаемых поверхностей примем с параметрами, определяемыми посадкой соединения.

Для таких соотношений точности сопрягаемых поверхностей с групповой взаимозаменяемостью без рассмотренной выше перенастройки оборудования образуется незавершенное производство в объеме, сравнимом с количеством собираемых прецизионных пар (до 50% и более). На графике, на рис. 3 его величина Q показана на оси OY при сборке соединений с участием валов, изготовленных с одной настройки ($k=1$): для кривой 1 – вал точнее отверстия на один квалитет, для кривой 2 – вал точнее отверстия на два квалитета. Для демонстрации возможностей изложенной выше методики расчета на рис. 3,б - показаны результаты аналогичного расчета, но для выборочного распределения диаметров в партии отверстий (задаваемого, например, таблицей). На графиках видно, что с увеличением числа настроек при заданной количественной программе изготовления валов, определяемой расчетом, количество некомплектных пар деталей уменьшается и достигает наименьшего (1,8%) при числе перенастроек $k = 5$ для условий, определяемых кривой 1 и (0,4%) при $k = 7$ – для кривой 2 (общий результат). То же имеет место и для выборочного распределения диаметров отверстий, но при $k = 6$ и $k = 5$, соответственно.

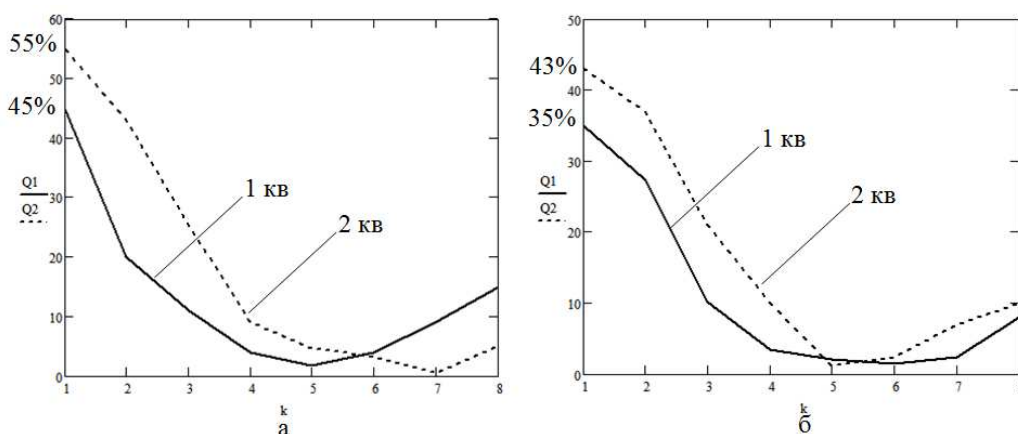


Рис. 3 Объем незавершенного производства в зависимости от числа перенастроек

Rys. 3. Liczność niewykorzystanych elementów w zależności od liczby przestawień

Зависимость, характеризующая уменьшение объема незавершенной продукции, показанная на рис. 3а, будет выдерживаться в производстве прецизионных соединений, когда объемы партий, поступающих на сборку деталей будут обладать устойчивыми нормальными распределениями (для крупносерийного и массового производств).

Для этого случая в качестве практических рекомендаций может применяться программа размерных настроек оборудования и количеств g_j обрабатываемых на них долей валов от общего объема изготавливаемой партии, приведенные в таблице в колонках 3 и 4.

Здесь значения величины ξ_j (колонка 3), корректирующей настроечный размер D_H (см. (3)) относительно номинального диаметра D соединения, приведены в единицах σ_A (σ_A – стандарт распределения диаметров отверстий, может быть установлен по допуску на диаметр отверстия).

В колонках 6, 7 и 8 приведена программа перенастроек и количества изготовления валов для оптимизированной по затратам сборки с групповой взаимозаменяемостью. В этом случае число перенастроек несколько уменьшается, их размеры меняются, а объем незавершенной продукции увеличивается.

Табл. 1. Расчетные параметры настроек оборудования для СО партии валов

Tabl. 1. Obliczeniowe parametry nastawień urządzeń dla optymalnego montażu partii wałów

| Соот-е точности обработки валов и отверстий; вал точнее отверстия: | Для достижения минимума НП | | | | Оптимизированные по минимуму затрат | | | |
|--|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| | Число настроек k | Значения ξ_j (в ед. σ_A) | Доля g партии валов | Величина Q (в %) | Число настроек k | Значения ξ_j (в ед. σ_A) | Доля g партии валов | Величина Q (в %) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| на один квалитет | 5 | -1,8 | 0,055 | 1,8 | 4 | -1,8 | 0,196 | 4,0 |
| | | -0,8 | 0,247 | | | -0,6 | 0,307 | |
| | | 0,0 | 0,396 | | | +0,6 | 0,307 | |
| | | +0,8 | 0,247 | | | +1,8 | 0,196 | |
| | | +1,8 | 0,055 | | | | | |
| на два квалитета | 7 | -2,2 | 0,09 | 0,4 | 5 | -2,2 | 0,13 | 3,6 |
| | | -1,6 | 0,121 | | | | | |
| | | -0,8 | 0,17 | | | -0,6 | 0,216 | |
| | | 0,0 | 0,238 | | | 0,0 | 0,308 | |
| | | +0,8 | 0,17 | | | +0,6 | 0,216 | |
| | | +1,6 | 0,121 | | | | | |
| | | +2,2 | 0,09 | | | +2,2 | 0,13 | |
| | | | | | | | | |

Однако эти рекомендации носят частный характер и пригодны для достижения минимальных затрат в случае, взятом для примера, когда затраты на перенастройку оборудования и соответствующие им потери производительности C_1 приравнены к стоимости C_2 одного прецизионного изделия. Более детальные исследования влияния соотношения ценовых коэффициентов показывают, что с увеличением серийности производства оптимальные условия перенастройки практически не зависят от их значений и приближаются к минимизирующим по объему незавершенной продукции и, соответственно наоборот, когда серийность производства прецизионной продукции уменьшается. В производствах малой серийности оптимизация программы изготовления валов приобретает решающее значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Л.А., Кесоян А.Г. Научное обоснование точной прецизионной продукции при межгрупповой взаимозаменяемости деталей в соединениях. Наука – производству, 2000г, №1, стр. 27-32.
2. Бахтияров Н.И., Логинов В.Е., Лихачев И.И. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1972. – 200с.

OPTIMIZATION OF PRECISION ASSEMBLY AT INCOMPLETE INTERCHANGEABILITY OF DETAILS IN JOINTS

Abstract. *In precision joints complementarity of details is incomplete in most cases(usually group), that leads to essential complication of assembly process and it is accompanied by decline of productivity and work in progress occurrence. Values of these losses can be steered, but it is connected with additional complications of assembly technologies and expenses for their realization. There is a problem of optimization of technology of assembly of the precision joints, minimizing losses from a work in progress and decline of productivity of dimensional acquisition. In the present report the decision of the specified problems of optimization is resulted.*

Victor F. GROMOV
Dmitriy A. OVSYANNIKOV
Instytut Lotniczy MAI
Moskwa, Rosja
Aleksandr F. MAKAROV
Uniwersytet Przyrody,
Spełeczeństwa i Człowieka
Dubna, Rosja

STAN NAPRĘŻEŃ I DEFORMACJI PRZY OBCIĄŻENIU ZESPOŁU PRZEGUBOWEGO Z WCIŚNIĘTĄ CIENKOŚCIENNĄ WТУЛКĄ

НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ШАРНИРНОГО УЗЛА С ЗАПРЕССОВАННОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ВТУЛКОЙ

В изделиях машиностроения широко используются шарнирные узлы, работающие под воздействием циклических нагрузок высокого уровня в условиях присущей им концентрации напряжений. Усталостные разрушения элементов шарнирного узла, как показано на рис. 1 приводят к значительным экономическим потерям из-за простоя дорогостоящего оборудования и техники. Как при производстве отдельных деталей шарнирного узла, так и при ремонте детали после разрушения имеются достаточно эффективные технологические методы увеличения их выносливости. Одним из направлений в этом плане является использование напряженных посадок цилиндрических деталей вал-втулка.

В строительных и подъёмных машинах распространены подвижные шарнирные узлы. Для увеличения износостойкости в таких узлах применяют втулки из материала с более высокой твёрдостью. Втулка может быть установлена с радиальным натягом. Поэтому было исследовано влияние радиального натяга посадки втулки в отверстие на концентрацию напряжений в пластине.

Отверстие находится вблизи края пластины, что значительно изменяет напряженное состояние в пластине как при посадке с натягом, так и при нагружении соединения. Напряженно-деформированное состояние, создаваемое посадкой с натягом, в этом случае является неосесимметричным. Контактные радиальные напряжения натяга будут переменными по окружности отверстия, а напряжения в перемычке до края пластины значительно больше, чем при посадке в отверстие, в бесконечной пластине. Особый интерес представляет решение задачи для посадки тонкостенной втулки, стенка которой является гибкой и мало препятствует неосесимметричной деформации отверстия. В этом случае произойдет искажение сечения втулки, в том числе внутреннего диаметра, то есть появится овальность. Расчёт напряжённого состояния, возникающего при нагружении узла силой, осложняется, кроме влияния края пластины, необходимостью решать контактную задачу для трёх тел: пластины, втулки и оси. При посадке втулки с натягом необходимо совместно решать задачу о напряженной посадке и контактную задачу для трёх тел.

Решение задачи о напряженной посадке в деталь произвольной формы, в частности, в проушину или отверстие у края пластины, а также задачи о нагружении отверстия силой классическими методами теории упругости является громоздким и возможно только числовыми методами с использованием ЭВМ. Современные методы конечного элемента, реализованные, в частности в программах COSMOS или ANSYS, позволяют значительно упростить решение подобных задач. Применение односторонних контактных элементов между осью, втулкой и пластиной позволяют учитывать силы трения в контакте, взаимное проскальзывание деталей

и возникновение зазоров на части окружности отверстия, что исключено при применении аналитических методов расчета.

Напряженно-деформированное состояние, создаваемое посадкой с натягом втулки в детали некруглой формы исследовано методом конечного элемента (МКЭ) с использованием программы COSMOS. В качестве объекта исследования была выбрана пластина с эксцентрично расположенным отверстием.

Расчётная схема приведена на рис.2. Размеры пластины 100x100 мм. Диаметр отверстия $D=20$ мм. Диаметр отверстия во втулке $d=0.84D=16.8$ мм. Ось установлена во втулку без натяга, величина зазора принята равной нулю. Нагрузка равномерно распределена по сечению оси.

Расстояние (перемычка) от центра отверстия до края пластины 20 мм, то есть перемычка от края отверстия до края пластины равна 10 мм, что достаточно для обеспечения прочности перемычки на разрыв.

Конечные элементы – плоские двумерные TRIANG. Для контакта использованы односторонние контактные GAP-элементы, коэффициент трения принят равным $f = 0$. Задача решалась в нелинейной постановке.

Материал пластины – чугун с механическими свойствами: модуль упругости $E = 1,2 \cdot 10^{11}$ МПа (12000 кгс/мм²), коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$. Материал втулки – сталь с механическими свойствами: $E = 2 \cdot 10^{11}$ МПа (20000 кгс/мм²), $\mu = 0,3$. Материалы приняты упругими во всем диапазоне напряжений. Для удобства перехода к другим величинам натяга в числовых расчетах принята величина натяга, равная 1%. Абсолютная величина натяга посадки втулки в пластину равна 0,20 мм (1%) или 0,1 мм на радиус. Также выполнен расчёт для посадки втулки в отверстие пластины с нулевым натягом.

Напряжения смятия между втулкой и пластиной приняты равными

$\sigma_s = 24.5$ МПа (2.5 кг/мм²). Соответственно, между осью и втулкой напряжения смятия равны 29 МПа (3 кг/мм²).

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчёта для случая посадки втулки в пластину без натяга. Напряжения в этом случае создаются только приложенной нагрузкой. При переменной внешней нагрузки они будут переменными напряжениями. Напряжений от напряжённой посадки нет. Угол контакта между втулкой и отверстием равен $\approx 40^\circ$ от оси симметрии узла. Закон распределения окружных напряжений по сечению перемычки (рис.3а) показывает явно выраженный «рамный эффект» и принципиально отличается от случая пластины бесконечных размеров, то есть, при значительной величине перемычки. В бесконечной пластине окружные напряжения убывают при удалении от отверстия. В настоящем случае распределение напряжений соответствует изгибу перемычки, как стержня рамы, нагруженного в середине поперечной силой. Максимальные напряжения имеют место на наружном крае пластины. Эквивалентные напряжения по Мизесу (рис. 3б) также отражают «рамный эффект». Распределение окружных и эквивалентных напряжений по окружности отверстия в пластине показано на рис. 4а и б. Максимум напряжений находится на угле $50-60^\circ$, где обычно начинается усталостное разрушение (см. рис. 1). Коэффициент концентрации напряжений по отношению к величине напряжений смятия между втулкой и пластиной равен $K=2.4$ для окружных и эквивалентных напряжений.

При посадке втулки с радиальным натягом, равным 1 %, как показал расчёт, форма отверстия искажается вследствие влияния края пластины. По оси симметрии диаметр отверстия в пластине увеличился на 0.38 %, в поперечном направлении на 0.28 %. Напряжения при нагружении узла с втулкой, установленной с радиальным натягом, приведены на рис.5 и 6. На них приведены суммарные напряжения, вызванные внешней нагрузкой и посадкой с радиальным натягом. Как следует из предыдущих результатов, напряжения натяга значительно больше, чем вызванные нагрузкой. Но напряжения натяга постоянные, поэтому слабо влияющие на усталостное разрушение. Напряжения от нагрузки переменные и являются определяющими при усталостном разрушении.



Рис. 1. Характерное разрушение детали шарнирного узла

Rys. 1. Charakterystyczne zniszczenie części zespołu przegubu kulistego

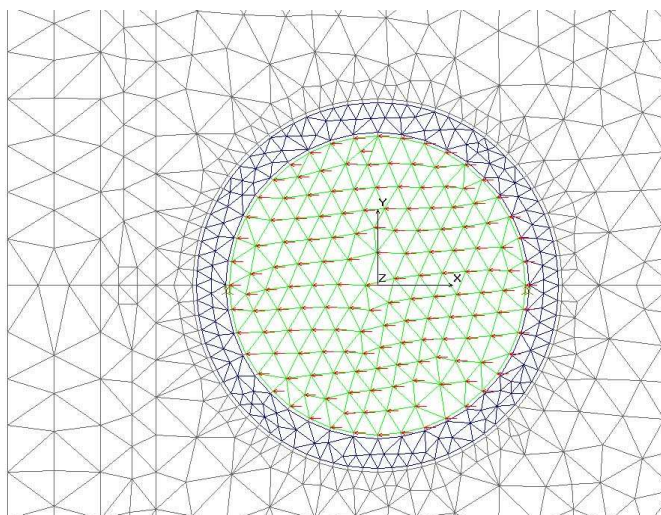


Рис. 2. Расчетная схема шарнирного узла

Rys. 2. Schemat obliczeniowy przegubu kulistego

Суммарные напряжения в перемычке (5а и б) показывают «рамный эффект» и для напряжений натяга. По окружности отверстия максимум окружных и эквивалентных напряжений находится также на угле $50-60^\circ$, рис. 6а и б.

Из суммарных напряжений были выделены напряжения, создаваемые нагрузкой. Путём сравнения с напряжениями от нагрузки при посадке без натяга получено следующее. Окружные и эквивалентные напряжения в перемычке уменьшились в 1.16-1.19 раза. На окружности отверстия в районе угла 50-60° окружные напряжения уменьшились в 1.13 раза, а эквивалентные в 1.32 раза. То есть, коэффициенты концентрации напряжений уменьшились в такое же число раз при переходе к посадке втулки с радиальным натягом.

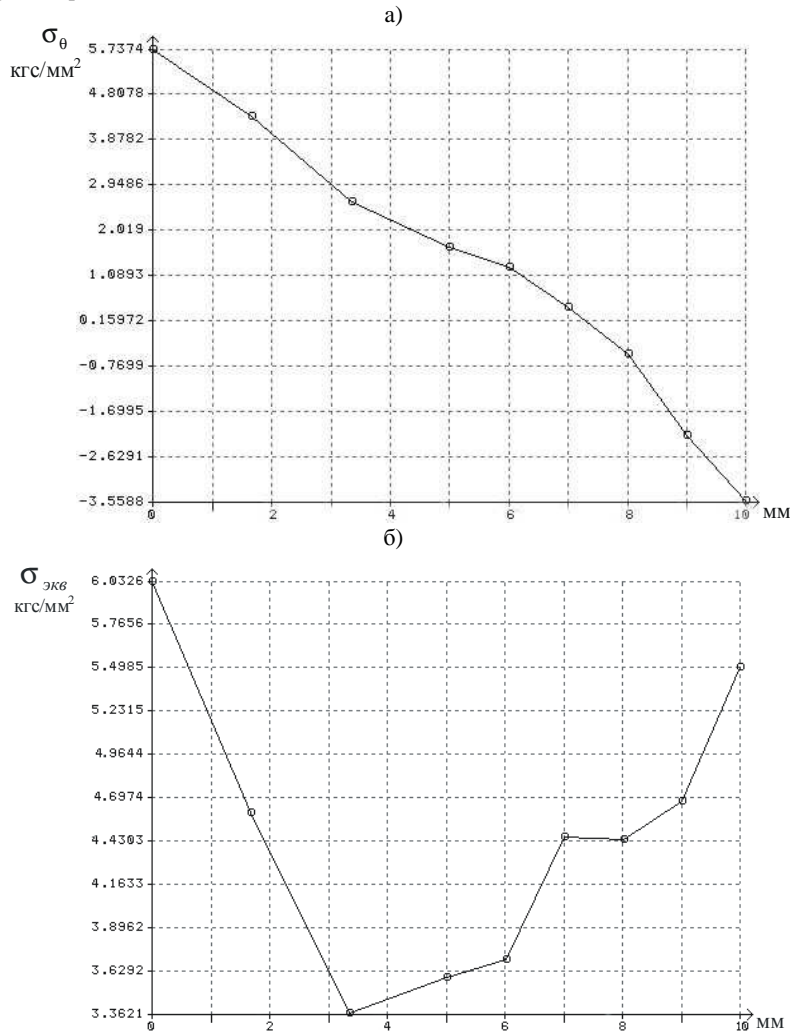


Рис. 3. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения в перемычке при посадке втулки без натяга

Rys. 3. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia w łączniku przy pasowaniu tulei bez wciskania

При посадке втулки без натяга вся нагрузка с оси передаётся на перемычку, а затем проходит через пластину, создавая концентрацию напряжений. При посадке с натягом втулка начинает участвовать в передаче нагрузки, разгружая перемычку.

При посадке без натяга средние окружные напряжения во втулке при угле 90° равны нулю. При посадке с натягом при приложении нагрузки в том же сечении втулки создаются растягивающие напряжения (дополнительные к сжимающим напряжениям натяга). То есть, во втулке создаётся усилие, передаваемое на обратную сторону отверстия (угол более 90°), которое разгружает перемычку. В данном случае доля разгрузки составляет 18 %, а напряжения натяга на обратной стороне отверстия уменьшаются на 6 МПа (0.6 кгс/мм^2). Отсюда можно определить требуемую величину натяга, необходимую для его сохранения по всей окружности отверстия при действии нагрузки.

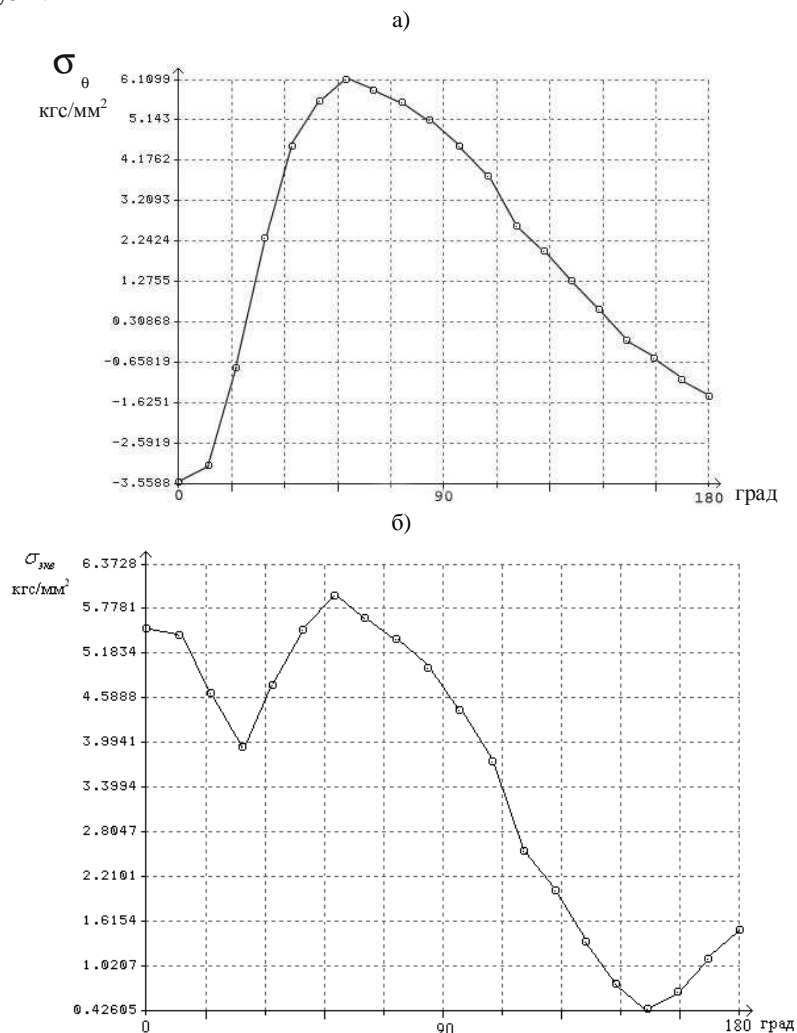


Рис. 4. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения по окружности отверстия в пластине на дуге 180° при посадке втулки без натяга

Rys. 4. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia na obwodzie otworu w płycie na łuku 180° przy pasowaniu tulei bez wciskania

Данные расчёты выполнены для случая, когда коэффициент трения между втулкой и пластиной в отверстии равен нулю. Если коэффициент трения больше нуля, эффект снижения концентрации напряжений будет выше.

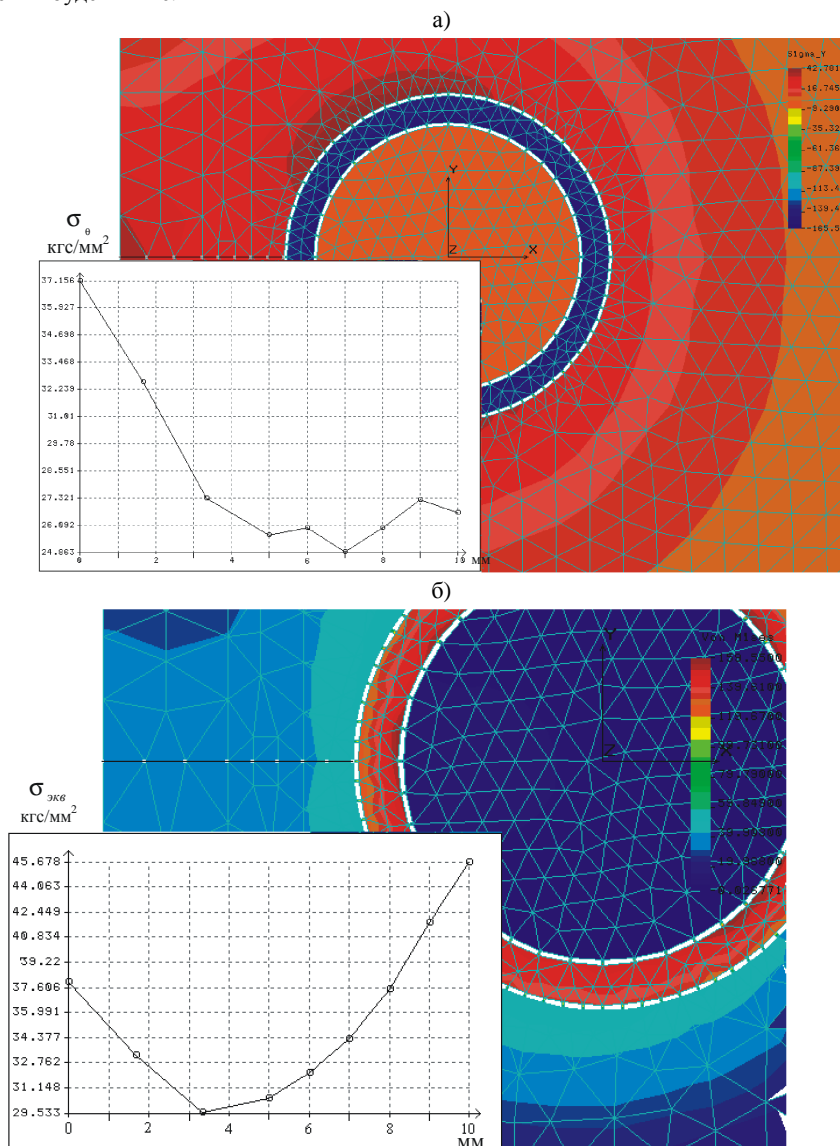


Рис. 5. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения в перемычке при посадке втулки с натягом

Rys. 5. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia w łączniku przy pasowaniu tulei z wciskaniem

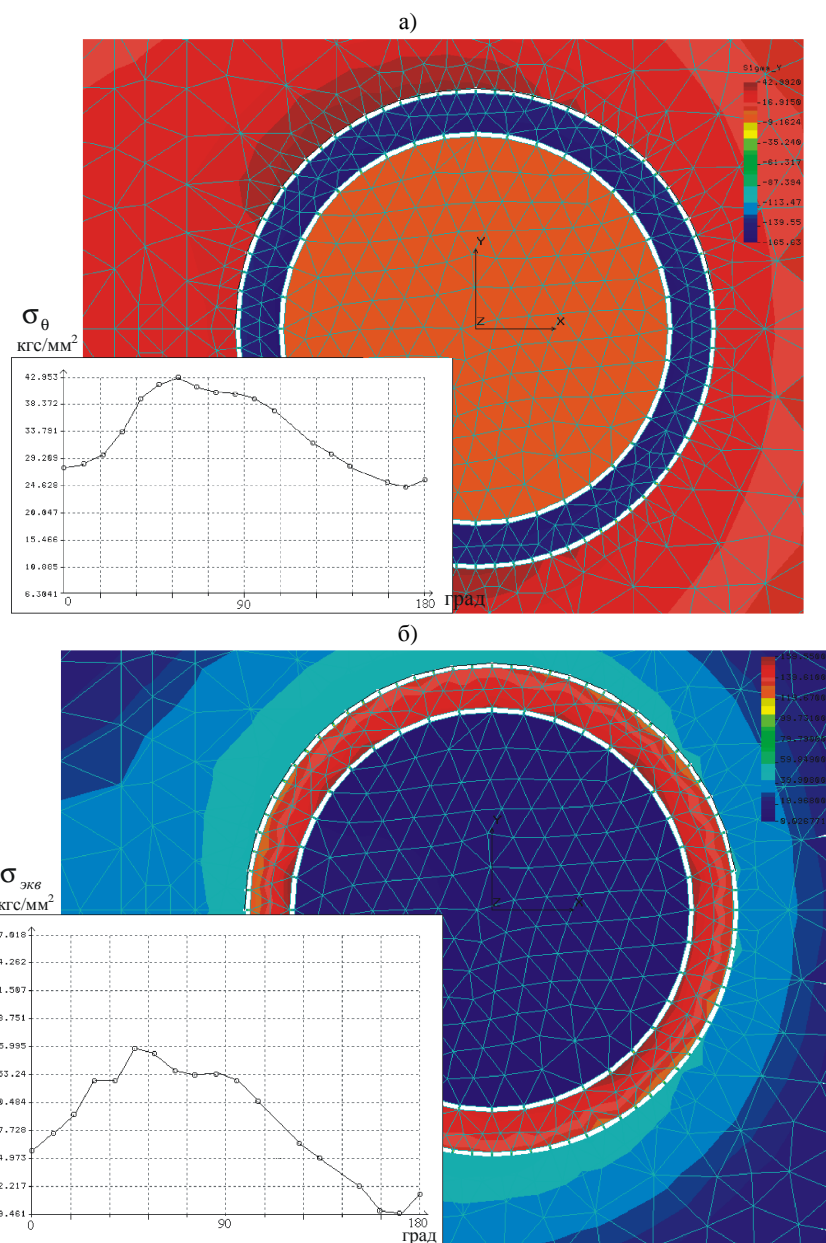


Рис. 6. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения в по окружности отверстия в пластине на дуге 180° при посадке втулки с натягом

Rys. 6. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia na obwodzie otworu w płytce na łuku 180° przy pasowaniu tulei z wciskaniem

ВЫВОДЫ

1. Посадка втулки с радиальным натягом приводит к уменьшению концентрации переменных напряжений при нагружении шарнирного узла. Часть нагрузки при этом передаётся через втулку, приводя к разгрузке перемычки до края пластины. Напряжения натяга на обратной стороне отверстия уменьшаются.

2. Форма отверстия при посадке с натягом искажается вследствие влияния края пластины.

3. Метод конечных элементов позволяет рассчитать напряжения в шарнирном узле и оценить требуемую величину натяга для обеспечения его сохранения по всей окружности отверстия при нагружении.

STRESSED-DEFORMED STATE WHILE HINGE JOINT WITH EMBEDDED THIN-WALL PLUG IS LOADED

Abstract. Article covers stress-deformed analysis under load of hinge joint elements with embedded high-strength plug in comparison with slide fitted plug.