



В. М. Нечипоренко



В. А. Сало



П. І. Літовченко



А. П. Горбунов



Д. А. Босик

КРИТЕРІЙ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ПОСАДКИ З НАТЯГОМ ПРИ АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПРОЕКТУВАННІ

Пропонується новий підхід до вибору раціональних значень геометричних параметрів посадки з натягом на базі їх аналізу у автоматизованому проектуванні досліджуваного з'єднання за сформульованим у статті аналітичним критерієм пошуку значень посадкових довжини і діаметра. Ефективність методу показана на конкретному прикладі чисельного розрахунку.

К л ю ч о в і с л о в а: посадка з натягом, автоматизоване проектування, посадкова робоча довжина, посадковий діаметр, діапазон зміни значень геометричних параметрів, область існування геометричних параметрів посадки, теорія R -функцій.

Постановка проблеми. Якість конструкцій виробів сучасної військової техніки, обладнання та озброєння суттєво залежить не тільки від рівня технічної оснащеності підприємства, а й від ступеня автоматизації виробництва і, що не менш важливо, від автоматизації на стадії їх проектування.

Для таких виробів застосовуються різноманітні складальні операції, вагома частина з яких належить з'єднанням з натягом по гладкій поверхні. Їх автоматизоване проектування значно пов'язане з визначенням нормованої точності, що є одним із суттєвих питань норм взаємозамінності. Наразі вибір одного з альтернативних варіантів проектних рішень на основі результатів типового розрахунку посадок з натягом залишається актуальним, оскільки він переважно ґрунтується на методах прецедентів і подоби, а також досвіді застосування існуючої технології виробництва деталей і вузлів військової техніки. Такий підхід вимагає від проектувальника великого прикладного досвіду, тому ефективність проєктованих деталей і вузлів зазвичай залежить від суб'єктивного фактора.

Використання комплексного методу математичного моделювання на основі результатів автоматизованого проектування з урахуванням факторів обмежень дозволяє покращити процес конструювання технічних виробів, визначити більш раціональні параметри та спостерігати, як їх зміна впливає на якість з'єднання, а в остаточному підсумку вибрати ефективне проектне рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] розглянуто принцип вибору посадок з натягом для з'єднань по гладкій циліндричній та конічній поверхнях з двома способами пресування. З цією метою застосовано програмний засіб – розрахунковий блок АРМ Joint в автоматизованій системі АРМ WinMachine. У процесі розрахунку програма обчислює відповідні до алгоритму параметри, після чого здійснюється підбір всіх можливих альтернативних посадок з натягом, що відповідають, на думку користувача, допустимим умовам. Інших рекомендацій щодо вибору остаточного проектного рішення така програма не видає.

У наукових працях [2, 3] на основі результатів чисельно-аналітичних досліджень, отриманих за допомогою автоматизованих розрахунків, побудовано математичну модель області існування посадок з натягом у системі координат lpN , де l – робоча довжина з'єднання, p – питомий тиск, N – натяг при певному значенні діаметра d . Тривимірну модель lpN для певного значення діаметра можна розкласти на три двовимірні координатні площини lp , lN та pN у вигляді проєкцій [2]. У моделях lp та lN є можливість визначити раціональні діапазони значень робочої довжини для кожної з посадок з натягом, які відповідають умовам придатності, але важко визначити раціональні значення дійсного питомого тиску і допуску натягу.

© В. М. Нечипоренко, В. А. Сало, П. І. Літовченко, А. П. Горбунов, Д. А. Босик, 2020

За допомогою теорії R -функцій [4–6] більш детально досліджена і аналітично описана двовимірна модель області існування придатних посадок з натягом у координатній площині pN , $N = f(p)$ як основна складова тривимірної моделі lpN . Для обґрунтованого вибору проектного рішення за певного значення діаметра в моделі pN суттєвим є визначення форми локалізованої вірогідної зони придатних посадок з натягом і її аналітичний опис. У статті [6] наведені рекомендації у вигляді одного з критеріїв щодо вибору остаточного проектного рішення при автоматизованому проектуванні.

У статті [7] проведено дослідження, пов'язане з побудовою моделі області існування посадок з натягом у системі координат ldN , але модель досліджена частково, для вузького діапазона значень l .

Перед проектувальником на етапі формування вихідних даних зазвичай виникає питання вибору раціонального значення посадкового діаметра d . У разі типового розрахунку з'єднання з натягом у більшості випадків значення посадкового діаметра, звичайно, визначають за формулою $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$,

яка відповідає умовам придатності. Але головним є питання, наскільки ця формула є ефективною та раціональною. Не менш важливим залишається й визначення раціонального значення робочої довжини посадкового з'єднання l . Подібні питання сформульовані у статті [8], де здійснено лише аналітичний опис рекомендованого діапазона значень d і l та їх границь, за допомогою яких утворюється модель $abcd$ області існування геометричних параметрів посадок з натягом у двовимірній системі координат ld при використанні математичного апарату теорії R -функцій.

Мета статті полягає у формулюванні критерію вибору раціональних значень геометричних параметрів d та l у межах двовимірної моделі $abcd$ для придатних посадок з натягом та у проведенні *чисельно-аналітичних досліджень*, необхідних для подальшого ефективного вибору остаточного проектного рішення.

Виклад основного матеріалу. Дане дослідження базується на використанні вихідних даних, що подані у науковій статті [8].

Для пошуку раціональних значень геометричних параметрів посадкового діаметра d_j і робочої довжини l_k сформулюємо один з критеріїв їх вибору.

В області $abcd$ таких значень можна знайти безліч, тому для m кількості придатних альтернативних посадок вважаємо раціональними такі міркування:

1) для будь-якого дискретного значення посадкового діаметра d_j є певна кількість (множина) значень робочої посадкової довжини, що розташовані паралельно осі $0l$ (рис. 1) та знаходяться в діапазоні

$$\delta_{l_k} = l_{p \max_k} - l_{kp_k}, \quad (1)$$

де l_{kp_k} та $l_{p \max_k}$ – відповідно початкова і кінцева точки відрізка діапазона δ_{l_k} значень робочої посадкової довжини (параметри l_{kp_k} і $l_{p \max_k}$ описані у статті [8]), при цьому в межах області $abcd$ у найдовшому відрізку gh діапазона $\delta_{l_{\max}} = \delta_{l_k}$ дискретних значень l_k буде найбільше, тому діапазон $\delta_{l_{\max}}$ вважаємо раціональним;

2) для будь-якого дискретного значення робочої посадкової довжини l_k має бути певна кількість (множина) значень посадкового діаметра, які розташовані паралельно осі $0d$ та знаходяться в діапазоні

$$\delta_{d_j} = d'_2 - d'_1, \quad (2)$$

де d'_1 та d'_2 – відповідно початкова і кінцева точки відрізка діапазона δ_{d_j} значень посадкового діаметра; в межах області $abcd$ у найдовшому відрізку ef діапазона $\delta_{d_{\max}} = \delta_{d_j}$ дискретних значень d_j буде найбільше, тому діапазон $\delta_{d_{\max}}$ також вважаємо раціональним.

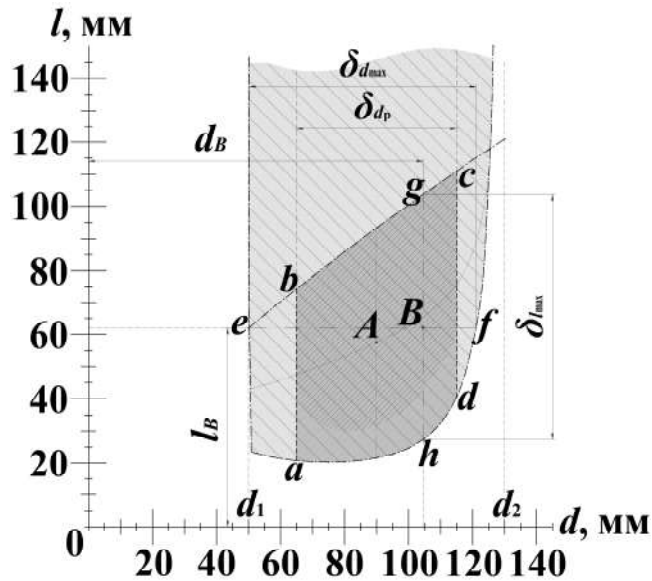


Рис. 1. Координати і діапазони граничних значень плоскої моделі області існування геометричних параметрів посадок з натягом

Визначити максимальні значення діапазонів раціональних значень d_j та l_k можна методом перебору усіх можливих варіантів ортогональних відрізків у межах плоскої моделі $abcd$ згідно із залежностями

$$\delta_{l_{\max}} = \frac{l_{p_{\max k}} - l_{kp_k}}{t_l}; \quad \delta_{d_j} = \frac{d'_2 - d'_1}{t_d}, \quad (3)$$

де t_l та t_d – величини кроків довжини і діаметра, через які встановлюються відповідні максимальні відрізки (діапазони) їх раціональних значень (у даній праці $t_l = 1$ мм, $t_d = 1$ мм).

Перетин цих ортогональних відрізків утворює точку B ($d_B; l_B$), де d_B та l_B – координати. Після аналізу і перебору значень $\delta_{d_{\max}}$ та $\delta_{l_{\max}}$ для нашого прикладу маємо B (104,50; 62,08). При цьому найбільший діапазон зміни значень діаметрів складає $\delta_{d_{\max}} = 70,87$ мм (від 50,26 мм до 121,13 мм), а найбільший діапазон зміни значень довжин $\delta_{l_{\max}} = 76,31$ мм (від 27,39 мм до 103,70 мм). Відзначимо, що значення посадкового діаметра d_j слід вибирати не з усього найбільшого діапазона діаметра $\delta_{d_{\max}}$, а з рекомендованого (вздовж відрізка ef)

$$\delta_{d_p} = (d_2 - 15) - (d_1 + 15). \quad (4)$$

У діапазоні від d_1 до $(d_1 + 15)$ (для нашого прикладу від 50 мм до 65 мм) міцність охоплюваної деталі (вала) буде доволі сумнівною, причиною чого є мала жорсткість охоплюваної деталі внаслідок незначної різниці діаметрів внутрішньої поверхні порожнини d_1 і посадкового діаметра d вала. Така обставина потребує підвищених вимог до міцності цієї деталі, а значення d_j не рекомендується вибирати в цьому діапазоні. Те ж саме питання міцності постає, якщо розглядати охоплюючу деталь (отвір) в діапазоні значень посадкового діаметра від $(d_2 - 15)$ до d_2 (для нашого прикладу від 115 мм до 130 мм). Методика отримання початкової $(d_1 + 15)$ і кінцевої $(d_2 - 15)$ точок рекомендованого відрізка δ_{d_p} описана у працях [7] і [8].

Остаточним критерієм пошуку раціональних значень геометричних параметрів d_j та l_k є перетин відрізків ef та gh , тобто діапазонів $\delta_{i_{\max}}$ та δ_{d_p} , що утворюють точку B раціональних значень d_B та l_B у межах плоскої моделі $abcd$, причому $\delta_{i_{\max}} \in \{l_{p_{\max}} \leq l_B \leq l_{kp}\}$ та $\delta_{d_p} \in \{(d_2 - 15) \leq d_B \leq (d_1 + 15)\}$.

Подемо в аналітичному вигляді опис точки B , що утворюється на перетині відрізків δ_{d_p} та $\delta_{i_{\max}}$. З цією метою, зазвичай, як і у дослідженнях [4, 5, 6, 8, 9], використаємо математичний апарат теорії R -функцій [10–14]:

$$\begin{aligned} \omega_B &= \omega_{d_B} \wedge_0 \omega_{l_B} = \omega_{d_B} + \omega_{l_B} - \sqrt{\omega_{d_B}^2 + \omega_{l_B}^2} = \\ &= d - d_B + l - l_B - \sqrt{(d - d_B)^2 + (l - l_B)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

де \wedge_0 – символ R -кон'юнкції, який використовується для перетину множин;

ω_{d_B} – множина у вигляді характерної для посадкового діаметра горизонтальної нескінченної прямої, яка ортогональна до координатної осі $0l$,

$$\omega_{d_B} = d - d_B; \quad (6)$$

d_B – дійсна координата точки B , що належить діапазону зміни значень посадкового діаметра δ_{d_p} у межах моделі плоскої фігури $abcd$;

$d - d_B$ – відстань від початку координатної осі $0d$ до координати точки B у межах моделі плоскої фігури $abcd$ (для нашого прикладу $d - d_B = 104,50$ мм);

ω_{l_B} – множина у вигляді характерної для робочої посадкової довжини вертикальної нескінченної прямої, яка ортогональна до координатної осі $0l$,

$$\omega_{l_B} = l - l_B; \quad (7)$$

l_B – дійсна координата точки B , що належить діапазону зміни значень посадкової робочої довжини $\delta_{i_{\max}}$ у межах моделі плоскої фігури $abcd$;

$l - l_B$ – відстань від початку координатної осі $0l$ до координати точки B у межах моделі плоскої фігури $abcd$ (для нашого прикладу $l - l_B = 62,08$ мм).

Після проведення автоматизованих розрахунків виявилось, що для всіх варіацій значень посадкових діаметра і робочої довжини в межах множини $abcd$ для нашого прикладу накладаються до десяти можливих альтернативних посадок з натягом, що відповідають умовам придатності. Найчастіше зустрічаються чотири посадки ($H8/u8$, $H7/u7$, $H7/v7$ і $H7/x6$) (рис. 2), для яких використовується складання методом повної взаємозамінності. Серед них найбільшу площу зони множини придатних рішень має $H7/x6$, але точка B як центр групування раціональних значень геометричних параметрів у цю множину не потрапляє, тому таку посадку слід виключити з числа ефективних. Для інших трьох посадок точка B входить до відповідної множини, тому їх можна вважати ефективними.

Результати дослідження підтверджують необхідність обґрунтованого вибору основних раціональних геометричних параметрів посадок з натягом (діаметра та робочої довжини) при їх автоматизованому проектуванні. Це дає можливість розробити детермінований ефективний алгоритм автоматизованого розрахунку посадок з натягом, оскільки, застосовуючи типовий метод розрахунку посадок, у виборі остаточного проектного рішення превалює суб'єктивний фактор – досвід та кваліфікація проектувальника. Стосовно визначення посадкового діаметра за формулою $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

дослідження показали, що вона не в усіх випадках є ефективною.

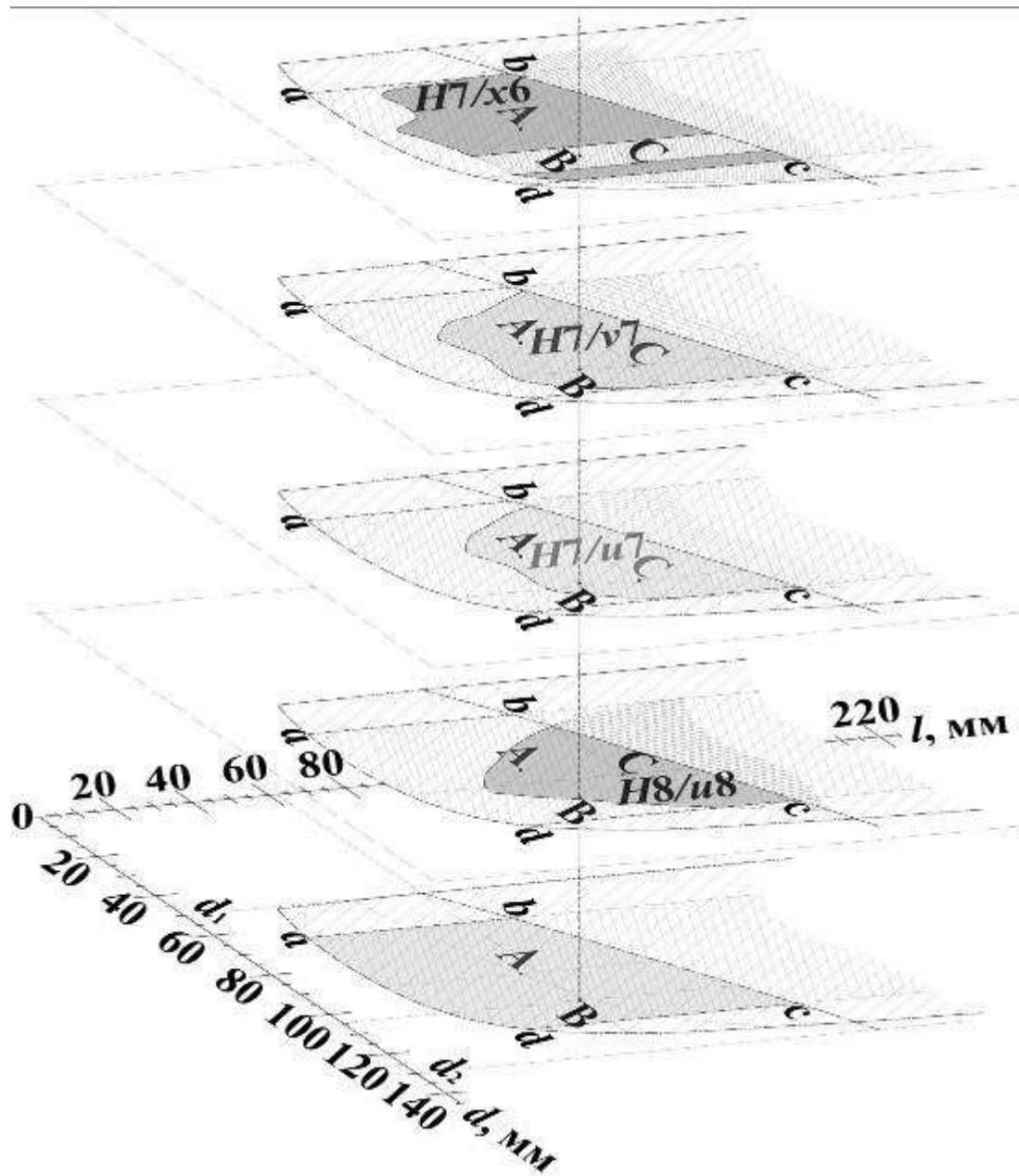


Рис. 2. Накладання альтернативних посадок, які входять до області існування геометричних параметрів посадок з натягом

Висновки

У статті сформульовано критерій вибору раціональних значень основних геометричних параметрів (посадкового діаметра і робочої довжини посадки), зміна яких суттєво впливає на остаточний вибір посадки з натягом і, як наслідок, на якість з'єднання. Реалізований у статті підхід полягає у визначенні центра групування шуканих величин – такої точки, яка є перетином відрізків діапазона зміни значень посадкового діаметра і діапазона зміни значень робочої посадкової довжини. Запропонований метод є ефективним і з погляду не тільки на одне раціональне рішення, а й на допустимі альтернативи. Це дозволило модернізувати програмний засіб, що використовується для моделювання параметрів посадок з натягом при їх автоматизованому проектуванні (наприклад, для бандажного з'єднання черв'ячних (зубчастих) вінців з маточиною колеса тягових лебідок та інших агрегатів і вузлів військової техніки).

Перелік джерел посилання

1. Каратаев О. Р., Хамидуллина Д. А., Тюрин А. Н. Соединения с натягом и расчеты в модуле АРМ Joint. *Вестник Казанского технологического университета. Машиностроение*. Казань, 2014. Т. 17. Вып. 23. С. 317–319.
2. Літовченко П. І., Нечипоренко В. М., Сало В. А., Іванова Л. П. Новий науково обґрунтований метод автоматизованого проектування посадок з натягом. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. Харків : *Акад. ВВ МВС України*, 2013. Вип. 1. С. 74–79.
3. Нечипоренко В. М., Літовченко П. І., Сало В. А., Іванова Л. П. Універсальний алгоритм вибору посадки з натягом на основі нового методу автоматизованого розрахунку її раціональних параметрів. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. Харків : *Акад. ВВ МВС України*, 2013. Вип. 2. С. 72–75.
4. Використання теорії R -функцій для створення раціональних посадок з натягом / В. М. Нечипоренко та ін. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НАНГУ, 2016. Вип. 2. С. 72–76.
5. Нечипоренко В. М., Сало В. А., Літовченко П. І., Іванова Л. П. Метод аналітичного опису кінцевої множини придатних посадок з натягом в області існування її n -параметричної моделі. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НАНГУ, 2017. Вип. 1. С. 97–102.
6. Дослідження кругової вірогідної зони придатних посадок з натягом при аналітичному моделюванні / В. М. Нечипоренко та ін. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НАНГУ, 2018. Вип. 1. С. 95–100.
7. Нечипоренко В. М., Літовченко П. І., Сало В. А., Іванова Л. П. Побудова n -параметричної математичної моделі раціональної посадки з натягом при її автоматизованому проектуванні для бандажних з'єднань. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НАНГУ, 2014. Вип. 2. С. 86–91.
8. Нечипоренко В. М., Сало В. А., Літовченко П. І., Горбунов А. П. Метод аналітичного опису області існування геометричних параметрів у автоматизованому проектуванні посадок з натягом. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НАНГУ, 2019. Вип. 1. С. 70–77.
9. Сало В. А., Горбунов А. П., Нечипоренко В. М. Дослідження вірогідної зони придатних посадок з натягом при автоматизованому проектуванні. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Житомир : ЖДТУ, 2017. Вип. 2, т. 1. С. 73–77.
10. Морачковский О. К., Ромашов Ю. В., Сало В. А. Метод R -функций в решении задач теории упругости на основе смешанного вариационного принципа Рейсснера. *Прикладная механика*. Киев, 2002. Т. 38, № 2. С. 65–71.
11. Сало В. А. О двусторонней оценке точности приближенных решений задач теории оболочек, полученных методом Ритца для неэкстремального функционала Рейсснера. *Доповіді НАН України*. Київ, 2003. № 1. С. 53–57.
12. Сало В. А., Литовченко П. И., Чижиков И. В. Напряженно-деформированное состояние упругой цилиндрической панели с отверстием. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов* : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”. Харьков, 2011. Вып. 1 (65). С. 63–70.
13. Сало В. А., Нечипоренко В. М. Дослідження міцності пружної циліндричної конструкції під дією локального навантаження. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НАНГУ, 2017. Вип. 2. С. 76–82.
14. Calculation of stress concentrations in orthotropic cylindrical shells with holes on the basis of a variational method / V. A. Salo et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, Issue 7 (99). P. 11–17. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.169631.

Стаття надійшла до редакції 04.02.2020 р.

УДК 621.8

В. Н. Нечипоренко, В. А. Сало, П. И. Литовченко, А. П. Горбунов, Д. А. Босик

КРИТЕРИЙ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОСАДКИ С НАТЯГОМ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Предлагается новый подход к выбору рациональных значений основных геометрических параметров посадок с натягом при их автоматизированном проектировании – посадочного диаметра и рабочей длины. Задача решена путем построения геометрической и аналитической моделей области существования значений основных параметров посадки с последующими численно-аналитическими исследованиями модели. На основе результатов данного исследования сформулирован аналитический критерий выбора рациональных значений геометрических параметров. Эффективность метода показана на конкретном примере численного расчета.

К л ю ч е в ы е с л о в а: посадка с натягом, автоматизированное проектирование, посадочная рабочая длина, посадочный диаметр, диапазон изменения значений геометрических параметров, область существования геометрических параметров посадки, теория R -функций.

UDC 621.8

V. Nechyporenko, V. Salo, P. Litovchenko, A. Horbunov, D. Bosyk

SELECTION CRITERION OF RATIONAL VALUES OF PARAMETERS OF INTERFERENCE FIT IN AUTOMATED DESIGN

The proposed scientific work considers and substantiates a new approach to selection of rational values of basic geometrical parameters of interference fit at their automated design – a fitting diameter and working length. A geometric and analytical model of the area was constructed, in which there are values of the basic parameters of fit. Then, numerical and analytical researches of this model were carried out. Based on the results of this research, an analytical criterion for choosing rational values of geometric parameters is formulated.

The proposed method is based on the definition of the center of intersection of the largest segments of the permissible ranges of changes in the values of diameter and working length. This center is represented as some coordinate point within the model in the two-dimensional coordinate system. The coordinate axes of this model use the fitting diameter and the fitting length. The position of this point is analytically described using the mathematical apparatus of the theory of R -functions.

These parameters are used in the automated design of the interference fits on the smooth cylindrical surface for jointed components of the direct engagement mechanical gears, for example, for the bandage joint of the ring gear to the wheel hub. This does have a keyless joint, the torque is fully transmitted by the friction forces in the fit.

Such joints are used in the units and mechanisms used in small arms and artillery and military equipment, as well as other technical products of general-engineering purpose at various methods of assembly by a method of full interchangeability.

The effectiveness of the method is shown in a specific example of numerical calculation, the results of which are obtained using the software developed by the team of authors of this work

К е y w o r d s: interference fit, automated design, fitting working length, fitting diameter, range of modification of values of geometrical parameters, area of existence of geometrical parameters of fit, theory of R -functions.

Нечипоренко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

<http://orcid.org/0000-0002-4727-7344>

Сало Валентин Андрійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0003-2533-0949>

Літовченко Петро Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

<http://orcid.org/0000-0002-4483-597X>

Горбунов Андрій Петрович – кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника навчально-методичного центру – начальник навчального відділу Національної академії Національної гвардії України.

<http://orcid.org/0000-0002-3639-7957>

Босик Дмитро Андрійович – курсант Національної академії Національної гвардії України.

<http://orcid.org/0000-0002-8258-9060>