

УДК 621.002.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ З'ЄДНАНЬ З ГАРАНТОВАНИМ НАТЯГОМ

Петко І. В., Біла Т. Я.

Київський національний університет технологій та дизайну

Мета. Удосконалення конструкцій з'єднань з натягом за рахунок збільшення зони контакту практично до номінальної.

Методика. В роботі використовуються експериментальні методи досліджень.

Результати. Отримані значення границі витривалості з'єднань деталей з натягом при одночасному впливі різних покриттів і пластичного деформування.

Наукова новизна. В роботі показана ефективність підвищення експлуатаційної надійності та довговічності з'єднань з гарантованим натягом за рахунок введення в зону контакту антикорозійних покриттів одночасно з накаткою поверхні охоплюваної деталі (валу).

Практична значимість. Запропоновані шляхи удосконалення конструкцій з'єднань з гарантованим натягом за рахунок доведення фактичної площі контакту практично до номінальної.

Ключові слова: вал, втулка, гарантований натяг, границя витривалості, поверхнєве зміцнення, пластичне деформування

Відомо, що посадки з гарантованим натягом використовуються в нерухомих з'єднаннях, як правило, без додаткових закріплень [1]. Відносна нерухомість деталей в цих посадках досягається за рахунок напружень, які виникають в матеріалах з'єднаних поверхонь під дією деформацій в місцях контакту. При цьому, за інших рівних умов, напруження пропорційні деформації. В більшості випадків посадки з натягом забезпечуються пружними деформаціями, але при відносно великих натягах виникають пружно-пластичні деформації, що допустимо [2]. При одному і тому ж натязі міцність з'єднань залежить від матеріалу и розмірів деталей, шорсткості з'єднуваних поверхонь, швидкості запресовки, умов нагрівання та охолодження і таке інше.

Використовуються такі основні способи з'єднання деталей з натягом: складання під дією преса, який здійснює осьове зусилля при нормальній температурі (метод поздовжньої деформації); складання з попереднім підігрівом охоплюючої деталі (отвору) або охолодження охоплюваної деталі (валу) до певної температури (метод термічної деформації або поперечна запресовка). Складання під пресом – найбільш відомий та поширений метод, який використовується при відносно невеликих значеннях натягів (до 0,001 діаметра з'єднання d_H). Визначальним фактором міцності з'єднання є контактна взаємодія поверхонь деталей – спроможність з'єднання

витримувати в умовах експлуатації осьові зусилля, крутні моменти або їх одночасну дію. Міцність з'єднань з використанням теплових методів, як правило, більша, тому що вони забезпечують технологічний процес складання практично без пошкоджень з'єднувальних поверхонь матеріалів в зоні контакту. Така специфіка теплових методів складання дає можливість зменшення необхідних натягів і напружень в зоні контакту.

В зв'язку з тим, що в складальних одиницях машин, до яких входять з'єднання з натягом, як правило, збільшення габаритів та величини контактного тиску часто практично неможливо, то залишається єдиний раціональний шлях – доведення фактичної площі контакту практично до номінальної. Вирішення цієї задачі може бути за рахунок нанесення в зону контакту антифрикційних покриттів.

З'єднання з натягом практично завжди працюють в умовах навантажень, які циклічно змінюються, а тому для підвищення міцності втомлюваності використовується наклеп поверхні валів накаткою або ударами дробу.

Постановка завдання

З метою підвищення експлуатаційної надійності та довговічності з'єднань нами запропоновано одночасне нанесення покриттів в зону контакту і зміцнююча накатка валу.

Результати досліджень

В роботі показана ефективність підвищення довговічності з'єднань з натягом за рахунок нанесення антикорозійних покриттів з одночасним пластичним деформуванням поверхні валу. Тривалість служби з'єднань з натягом залежить від умов експлуатації з'єднання, конструкції і технології виготовлення деталей.

Поверхнєве зміцнення валів є ефективним засобом підвищення довговічності з'єднань з натягом [2]. Із способів зміцнення поверхнєвим пластичним деформуванням найбільшого поширення набула обкатка валів або їх підступичної частини роликками. З термічних і хіміко-термічних способів поверхнєвого зміцнення валів найбільш широко застосовують поверхнєве загартування і цементацію. Ефективним засобом підвищення довговічності з'єднань з натягом є також зміцнення поверхні охоплюючої деталі особливо в разі, якщо висота деталі обмежена. Підвищення міцності з'єднань з натягом досягається поєднанням цементації з обкаткою роликками.

Нанесення покриття з цинку, кадмію, міді, нікелю, хрому та інших матеріалів на охоплювану деталь сприяє підвищенню міцності з'єднань з натягом, яка прямо пропорційна коефіцієнту тертя:

$$P = \pi f p \cdot d \cdot l,$$

де f – коефіцієнт тертя; p – питомий тиск на контактній поверхні; d і l – номінальні діаметр і довжина сполучених поверхонь.

У з'єднаннях з покриттями коефіцієнти тертя значно вище, ніж в з'єднаннях без покриття [3]. Сутність застосування покриттів в поєднанні з поверхневим зміцненням полягає в тому, що після остаточної механічної обробки поверхню охоплюваної деталі (валу) зміцнюють обкаткою роликми або струменем дробу, а потім гальванічним способом наносять шар покриття, яке ефективно для різних умовами роботи з'єднання.

Тому що габарити з'єднань повинні бути по можливості мінімальними, а зона контакту максимально більшою, то для досліджень нами обрані поверхні з конічною посадковою частиною. Для дослідження впливу розгляданого способу на збільшення міцності і довговічності з'єднання були виготовлені і випробувані п'ять груп дослідних зразків по 15 штук. Вали діаметром 36 мм зі сталі 18ХГТ цементували (твердість цементованного шару HRC 58...60), а втулки діаметром 72 мм зі сталі 40Х піддавали загартовуванню (твердість HRC 44...46). Після цього з'єднувальні деталі шліфували електрокорундовим кругом, забезпечуючи шорсткість поверхні $Ra = 0,32...0,16$ мкм. У табл. 1 вказані способи обробки з'єднувальних поверхонь валів для кожної групи зразків.

Таблиця 1

Вплив гальванічних покриттів в поєднанні з поверхневим зміцненням на міцність з'єднання з натягом

Група зразків	Спосіб обробки поверхні валів після цементації і шліфування	Зусилля розпресування, кН	Момент тертя при скручуванні, 10^5 Н·м	Границя витривалості	
				МПа	%
1	Наклеп дробом	102	175	87	77
2	Обкатка	108	174	113	100
3	Цинкування	138	262	92	82
4	Обкатка, цинкування	193	397	163	144
5	Наклеп дробом, цинкування	226	487	190	168

Поверхні валів обкатували двома роликми, виготовленими зі сталі Р18. Твердість після їх загартовування – HRC 63...65. Діаметр роликів – 50 мм, радіус профілю – 5 мм. Режим обкатки: тиск ролика – 8 кН, швидкість обкатки – 0,5 м/с, поздовжня подача – 0,1 мм/об, число проходів – 1. Наклеп сталевим дробом діаметром 0,8...1,2 мм виконували за допомогою механічного ротаційного дробомета. Режим

обробки: швидкість дробу 90...100 м/с, частота обертання валика 1 об/с, кут падіння дробу 70°, тривалість наклепу 3 хв.

На з'єднувальні поверхні валів 3, 4 і 5-ї груп (табл. 1) одночасно наносили цинкове покриття товщиною 8...10 мкм у ванні з температурою електроліту 20° С і густиною струму 1,6 А/дм². Вали запресували на спеціально обладнаному пресі з постійною швидкістю, забезпечуючи при цьому натяг 0,19...0,21 мм. Після складання зразки (по три з кожної групи) випробовували на міцність при розпресуванні і скручуванні та на циклічну втому при згині з обертанням (по 6...8 зразків).

Результати визначення міцності з'єднань при розпресуванні та скручуванні представлені в табл.1. Як видно з таблиці, обкатка і наклеп дробом сполученої поверхні вала забезпечують практично рівну міцність з'єднання при розпресуванні та скручуванні (1-а і 2-а групи зразків). Цинкування сполученої поверхні (3-тя група) в порівнянні з її зміцненням обкаткою або наклепом дробом дозволяє підвищити міцність з'єднання при розпресуванні в 1,28...1,35 рази, а момент тертя при скручуванні збільшується в 1,5 рази.

Поєднання одночасного зміцнення поверхневого шару і цинкування значно підвищує статичну міцність з'єднання. Міцність з'єднання у зразків 4-ї групи зросла в порівнянні з міцністю зразків 1-ї групи при розпресуванні в 1,8 рази, а момент тертя при скручуванні збільшився у 2,3 рази. Міцність з'єднання у зразків 5-ї групи в порівнянні з міцністю зразків 1-ї групи підвищилася при розпресуванні в 2,25 рази, а момент тертя при скручуванні збільшився в 2,8 рази. Порівняно із зразками 3-ї групи зусилля розпресування і момент тертя у зразків 4-ї групи збільшуються відповідно в 1,4 та 1,5 рази, а у зразків 5-ї групи – в 1,65 та 1,85 рази. Міцність зразків 5-ї групи порівняно зі зразками 4-й вище при розпресуванні на 18%, а момент тертя при скручуванні – на 25%.

Дослідження на циклічну втому зразків п'яти груп проводили на машині для випробування консольних зразків при згинанні. Випробування проводилися при частоті навантажень 1500 циклів/хв. до руйнування зразка або до досягнення $1 \cdot 10^7$ циклів навантаження, які були прийняті за базу. На рис. 1 показані криві втоми зразків п'яти груп. Значення їх границь витривалості наведені в табл. 1. Руйнування валів у всіх випадках відбувалося поблизу лінії переходу циліндричної поверхні в конічну.

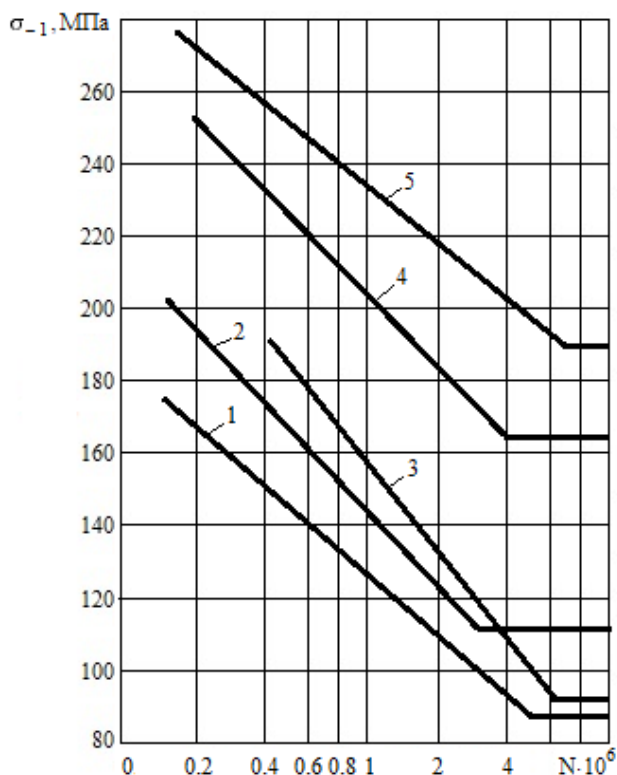


Рис. 1. Витривалість валів з різними методами обробки
(номера кривих відповідають номерам груп зразків в табл. 1)

Як видно з рис. 1 та табл. 1 найменше значення границі витривалості мають зразки 1-ї групи, зміцнені наклепом дробом. Границя витривалості цих зразків в порівнянні із зразками 2-ї групи нижче в 1,3 рази. Це пояснюється тим, що при обробці поверхні дробом збільшується її шорсткість, внаслідок чого зменшується площа контакту поверхонь (про це свідчить характер руйнування). В обох випадках зародження тріщин в томи і руйнування зразків відбувалося трохи нижче лінії переходу циліндра в конус. При цьому відстань від лінії переходу до площини руйнування у зразків 2-ї групи більше, ніж у зразків 1-ї групи. Це пояснюється, очевидно, тим, що при навантаженні вала виступи на поверхні конуса біля лінії переходу зминаються, завдяки чому максимально напружений перетин дещо зміщується в бік конуса.

Границя витривалості зразків 3-ї групи приблизно така ж, як у зразків 1-ї. Поєднання зміцнення і подальшого цинкування дозволяє підвищити границю витривалості з'єднання в 1,45...2,2 рази, що пояснюється збільшенням фактичної площі контакту поверхонь. При цьому найбільшу границю витривалості мають зразки 5-ї групи, у яких поверхні валів обробили наклепом дробу з подальшим цинкуванням. Границя витривалості цих зразків на 17% вище, ніж зразків 4-ї групи, у яких

з'єднувальні поверхні валів були оцинковані після обкатки роликками. Це пояснюється підвищеною міцністю зчеплення плівки покриття з основним металом, а також деяким зношуванням поверхні при наклепі дробом, в результаті чого знімається тонкий шар, максимально насичений дефектами, що виникають при шліфуванні. При обкатці дефекти поверхневого шару залишаються, викликаючи в ньому додаткову концентрацію напружень при навантаженні.

Дослідження впливу мастила і хімічно активних присадок до нього та цинкового електролітичного покриття на довговічність з'єднань з натягом, що працюють в умовах циклічної дії згинального моменту, проводили на зразках з циліндричною посадковою частиною. Вали з'єднання діаметром 36 мм виготовили зі сталі 18ХГТ і цементували на твердість HRC 58...62. Після термічної обробки партію валів з твердістю HRC 59...60 піддали остаточному чистовому шліфуванню електрокорундовим кругом. Втулки виготовили зі сталі 40Х і загартовували до твердості HRC 44...47. Після загартовування поверхню втулок з твердістю HRC 45...46 також шліфували. На частину шліфованих валів було нанесено цинкове покриття товщиною 8...10 мкм. Кожну пару підбирали таким чином, щоб величина натягу не відрізнялася від номінальної більш ніж на 5 мкм.

Випробування проводилися на машині для випробування консольних зразків на втому при згині з обертанням. Всього було випробувано 5 груп зразків. Одна група зразків була випробувана без змащення, дві групи – з мастилом (веретенним маслом) і дві – з мастилом із 98% веретенного масла та 2% присадки ДФ-11, що містить 4,7% цинку, 5,3% фосфору і 10% сірки. Мастило за допомогою насоса через дві форсунки подавали в зону з'єднання вала з втулкою з обох сторін таким чином, щоб вона потрапляла в зону найбільших напруг. Випробування проводилися при частоті навантажень 1500 циклів в хвилину до руйнування зразка або до досягнення $1 \cdot 10^7$ циклів навантаження, які були прийняті за базу. Результати дослідів оброблені за загальноприйнятою методикою і на рис. 2 приведені отримані криві втоми. Значення границі витривалості зразків різних груп наведені в табл. 2. Руйнування зразків у всіх випадках відбувалося по валу поблизу лінії, утвореної перетином площини втулки з циліндричною поверхнею вала.

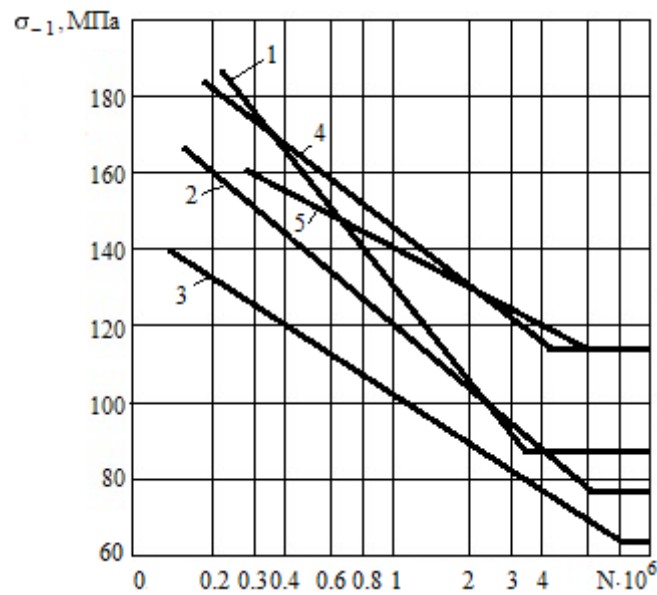


Рис. 2. Втома зразків в залежності від стану поверхні вала і виду мастила (номера кривих відповідають номерам груп зразків в табл. 2)

Таблиця 2

Вплив мастила і цинкового покриття на границю втоми зразків

Група зразків	Покриття	Умови випробовування	Границя витривалості	
			МПа	%
1	Без покриття	Без мастила	87	100
2	Без покриття	З мастилом (веретенне масло)	78	90
3	Без покриття	З мастилом (веретенне масло з присадкою)	63	73
4	Цинкове	З мастилом (веретенне масло)	113	133
5	Цинкове	З мастилом (веретенне масло з присадкою)	113	130

Як видно з рис. 2 та табл. 2 із зразків без покриття найбільше значення границі витривалості мають зразки 1-ї групи, що випробовують без змащення. Границя витривалості зразків 2-ї групи, що випробовуються зі змазкою веретенним маслом, на 10% нижче, а зразків 3-ї групи, що випробовуються зі змазкою веретенним маслом з присадкою, на 24% нижче в порівнянні з границею витривалості зразків 1-ї групи. Отже, наявність мастила призводить до зниження границі витривалості, а присутність в ній хімічно активних речовин посилює цей ефект. Очевидно, що підвищення швидкості руйнування з'єднання при наявності мастила відбувається завдяки тому, що воно,

потрапляючи в мікротріщину, яка виникла у результаті втоми металу, при подальшому підвищенні тиску сприяє її зростанню. Крім того, мастило, проникаючи між сполученими поверхнями, знижує коефіцієнт тертя. Про це свідчить характер зламу вала - злам в цьому випадку відбувається дещо глибше торцевої поверхні втулки.

Хімічно-активні речовини в мастилі підвищують швидкість руйнування з'єднання. Вони сприяють розм'якшенню поверхневих шарів металу в зоні контакту, що, в свою чергу, знижує його опір росту тріщин, завдяки чому знижується границя витривалості вала в з'єднаннях. Про це свідчать результати випробувань зразків 4-ї і 5-ї груп, на вали яких нанесено цинкове покриття. Границя витривалості цих зразків дорівнює 113 МПа, що вище на 30% границі витривалості зразків 1-ї групи, в 1,65 рази зразків 2-ї групи і в 1,8 рази зразків 3-ї групи. Висока границя витривалості зразків 4-ї та 5-ї груп пояснюється закриттям мікротріщин та ізоляцією основного металу від мастила, підвищенням фактичної площі контакту, зниженням концентрації напружень в валу в зоні кромки втулки.

Висновки

Значному підвищенню міцності і довговічності з'єднань з натягом сприяє застосування покриттів в поєднанні з поверхневим зміцненням охоплюваної деталі. При необхідності збільшення площі контакту і забезпечення малих габаритів складальних одиниць рекомендується використовувати конічні з'єднання з натягом. Введення в зону з'єднання антифрикційних покриттів дає можливість забезпечити збільшення зони контакту практично до номінальної.

Список використаних джерел

1. Петко І. В. Розрахунок та конструювання електромеханічних пристроїв : навч. пос. / І. В. Петко, М. Й. Бондаренко, В. В. Кострицький. – К. : КНУТД, 2016. – 328 с.
2. Зайдес С. А. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования: Монография. – Иркутск : ИрГТУ, 2007. – 404 с.
3. Кондратов Л. П. Технология материалов и покрытий / Л. П. Кондратов, Н. Н. Божко. – М. : МГУП, 2008. – 226 с.

References

1. Petko, I.V. Bondarenko, M.Y. & Kostytskyi, V.V. (2016). *Rozrakhunok ta konstruiuvannia elektromekhanichnykh prystroiv : navch. pos.* [Calculation and design of electromechanical devices: training. pos.] Kyiv : KNUTD. [in Ukrainian].
2. Zaydes, S.A. (2007). *Tehnologicheskie protsessyi poverhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya: Monografiya* [Technological processes of surface plastic deformation]. Irkutsk: IrGTU. [in Russian].
3. Kondratov, L.P. & Bozhko, N.N. (2008). *Tehnologiya materialov i pokrytiy* [Material and coating technology] M. : MGUP. [in Russian].

Petko IgorORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7695-9846>petkoknutd@gmail.comKyiv National University of
Technologies and Design**Bila Tetyana**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>ResearcherID: [T-5276-2018](https://orcid.org/0000-0001-8937-5244)bila.ty@knutd.edu.uaKyiv National University of
Technologies and Design***Повышение эксплуатационной надежности и долговечности соединений с гарантированным натягом******Петко И. В., Белая Т. Я.****Киевский национальный университет технологий и дизайна****Цель.*** Совершенствование конструкций соединений с натягом за счет увеличения зоны контакта практически до номинальной.***Методика.*** В работе используются экспериментальные методы исследований.***Результаты.*** Получены значения предела выносливости соединений деталей с натягом при одновременном воздействии различных покрытий и пластического деформирования.***Научная новизна.*** В работе показана эффективность повышения эксплуатационной надежности и долговечности соединений с гарантированным натягом за счет введения в зону контакта антикоррозионных покрытий одновременно с накаткой поверхности охватываемой детали (вала).***Практическая значимость.*** Предложены пути совершенствования конструкций соединений с гарантированным натягом за счет доведения фактической площади контакта практически до номинальной.***Ключевые слова:*** вал, втулка, гарантированный натяг, предел выносливости, поверхностное упрочнение, пластическое деформирование***Improving the operational reliability and durability of joints with guaranteed tension******Petko I. V., Bila T. Y.****Kiev National University of Technology and Design****Purpose.*** Improving the design of joints with tension by increasing the contact area to almost nominal.***Methodology.*** The work uses experimental research methods.***Findings.*** The values of the endurance limit of the joints of parts with tension under the simultaneous action of various coatings and plastic deformation are obtained.***Originality.*** The paper shows the effectiveness of improving the operational reliability and durability of joints with guaranteed tension due to the introduction of anticorrosion coatings into the contact area simultaneously with rolling the surface of the shaft.***Practical value.*** Ways to improve the design of joints with a guaranteed tension due to bringing the actual contact area to almost nominal are proposed.***Keywords:*** shaft, sleeve, guaranteed tension, endurance strength, surface hardening, plastic deformation