

## ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ОТРИМАННЯ НЕРУХОМОГО З’ЄДНАННЯ ОХОПЛЮВАНОЇ ТА ОХОПЛЮЮЧОЇ ДЕТАЛЕЙ

*У статті описано метод практичного застосування математичного моделювання при розрахунку необхідних геометричних параметрів повністю регулярного мікрорельєфу, який здатен забезпечити бажані експлуатаційні якості поверхні, а також метод оптимізації режимів обробки поверхні. Повністю регулярний мікрорельєф на поверхні утворюється за допомогою вібродинамічного накатування – методу, який було розроблено Ю.Г. Шнейдером. Результати розрахунків були перевірені в умовах, наближених до реальних умов експлуатації біметалевих підшипників ковзання. Наведено декілька прикладів режимів обробки, які були оптимізовані. Практичне застосування дозволяє підвищити міцність нерухомих з’єднань.*

Покращення параметрів мікрорельєфу поверхні – результат, який досягається завдяки використанню на практиці технологій механічного зміцнення. Однією з технологій механічного зміцнення, що базується на тонкому пластичному поверхневому деформуванні, є вібродинамічне накатування, у процесі якого можливе утворення регулярних мікрорельєфів різних типів.

Вібродинамічне накатування, в порівнянні з обробкою вигладжуванням, дозволяє одержати більшу глибину зміцненого шару металу, більш високу та однорідну мікротвердість, більш рівномірну структуру матеріалу та одночасно одержати поверхню з покращеними параметрами мікрорельєфу, який має доволі точні геометричні параметри. Крім того, змінюючи параметри мікрорельєфу, можна отримувати поверхні з оптимізованими для тих чи інших умов експлуатаційними властивостями. Визначити, які геометричні параметри поверхні найбільш забезпечують ті чи інші експлуатаційні властивості, можна за допомогою математичного моделювання, або шляхом проведення експериментальних досліджень. Але найбільш раціональним шляхом є поєднання цих методів: проведення досліджень, накопичення статистичних даних, аналіз та математичне моделювання на основі вибірок даних, що отримано. Кінцева експериментальна перевірка отриманого результату не є обов’язковою, але бажаною.

Отримання оптимальної вибірки вхідних даних – перший крок побудови правильної математичної моделі. В тому випадку, коли необхідно отримати геометричні характеристики мікрорельєфу контактуючих поверхонь, що забезпечують максимальну міцність нерухомого з’єднання, виконувались наступні дії.

Враховуючи не одну модель, а всю кількість моделей, близьких до моделей оптимальної складності, спочатку за допомогою експериментальних досліджень вивчались фактори, що входять у фізичну модель отримання повністю регулярного мікрорельєфу. Другий крок: за допомогою алгоритму системного аналізу (АСА) знаходили малу кількість факторів, що забезпечують несуперечливий прогноз. Кожна зміна прогнозувалась у функції ведучих змінних часу та попередніх власних значень. Вибір аргументів, що запізнюються, здійснювався за допомогою екстремумів кореляційних функцій. Кількість моделей, що перевіряють, можливо зменшити, а точність прогнозу збільшити, якщо обрати аргументи, що запізнюються у відповідності з екстремумами кореляційних функцій. Кількість предиктів визначалась за допомогою критерію істотності Стьюдента. Такий вибір забезпечував доволі точні рекомендації щодо кількості експериментів, які необхідно було провести, та даних, що потрібно зберегти, а також із вибору предиктів. Визначившись із кількістю моделей та похідними даними, за допомогою методу групового врахування аргументів (МГВА) для моделювання за даними експериментів, визначили найкращу модель, на основі якої знаходили геометричні характеристики мікрорельєфу. Цей метод базується на пошуку моделі оптимальної складності за допомогою перебору чисельності моделей-претендентів за зовнішніми критеріями.

ми. Принцип самоорганізації стверджує, що зовнішні критерії при поступовому збільшенні складності моделі спочатку зменшуються, а після проходження через мінімум починають збільшуватися в області переускладнених моделей. Мінімум критерію визначає єдину модель оптимальної складності. Результатом математичного моделювання були геометричні параметри мікрорельєфу, які необхідно було отримати на поверхні, щоб забезпечити необхідні експлуатаційні властивості виробу.

Саме від того, чи будуть на поверхні отримані геометричні параметри, які відповідають результатам математичного моделювання, залежить кінцевий результат – якісна поверхня, що має необхідний мікрорельєф. Отримавши виріб із мікрорельєфом на поверхні, геометричні характеристики якого відповідають результатам математичного моделювання, у нас з'являється можливість перевірити правильність математичної моделі.

Параметри, що визначають режими віброобкатування зовнішніх чи внутрішніх циліндричних поверхонь: частота обертання заготовки, подача деформуючого елемента на один оберт заготовки, амплітуда осциляції, кількість осциляції деформуючого елемента, діаметр заготовки, зусилля втискання деформуючого елемента, радіус сфери деформуючого елемента. На практиці режими обробки визначались у такій послідовності: спочатку радіус та інші геометричні параметри деформуючого інструмента. Далі визначали зусилля деформування. Визначивши зусилля деформування, обирали подачу інструмента на один оберт заготовки, ексцентриситет, частоту обертання шпинделя, кількість обертів автономного електропривода. Після отримання поверхні з повністю регулярним мікрорельєфом здійснювали перевірку якості поверхневого шару здійснювали за допомогою апаратних методів контролю. Для цього застосовували щупове профілометрування – профілометр 252 заводу “Калібр” із скануванням щупа за паралельними трасами, а також вимірювали мікротвердість. Якщо геометричні параметри поверхні відповідали бажаним, то далі перевіряли експлуатаційні властивості. Якщо перевірка геометричних параметрів виявила невідповідність якості поверхні, здійснювали оптимізацію режимів вібронакатування. Перевірку експлуатаційних властивостей здійснювали експериментальним шляхом, в умовах, наближених до реальних умов експлуатації. Якщо перевірка експлуатаційних характеристик виявляла невідповідність характеристик бажаним, у такому випадку здійснюємо накопичення статистичних даних, опрацьовували їх, змінювали та перевіряли математичну модель. Критеріями, за якими оптимізували режими обробки, є якість поверхневого шару, відповідність реальних експлуатаційних властивостей бажаним та собівартість.

Оптимізацію режимів обробки поверхні при нанесенні мікрорельєфу на контактуючі поверхні нерухомого з'єднання було здійснено за допомогою методу симплекс-планування. В якості вихідного плану експерименту при визначенні кількості факторів використовували матриці симплекс-плану у цілообчислювальній решітці. На основі матриці вихідного симплекса, значень факторів, що оптимізуються, а також інтервалів варіювання, здійснювався перехід до робочої матриці шляхом заміни кодових значень факторів натуральними, рух симплекс у факторному просторі здійснювався шляхом дзеркального відображення вершин. Методом, який описано вище, оптимізувалися режими обробки поверхні у випадку отримання нерухомого з'єднання способом, що підтверджено патентом України (реєстраційний номер заявки 200020560 від 01.02.2000 року, дата прийняття рішення – 21.06.2000р.). Цей спосіб може бути застосовано для виготовлення біметалевих втулок, що використовуються у верстатобудівній промисловості. Для отримання мікрорельєфу на поверхнях можна використовувати токарно-гвинторізний верстат, наприклад, моделі 16К20. Поверхню, згідно зі способом, вібронакатують при таких режимах (мікрорельєф ввігнутої форми на внутрішній поверхні деталі, що охоплює): кількість подвійних ходів –  $2700 \text{ хв}^{-1}$ ; подача інструмента –  $0,6 \text{ мм/об}$ ; ексцентриситет –  $2,6 \text{ мм}$ ; радіус сфери деформуючого елемента –  $2,5 \text{ мм}$ ; сила утискування сфери у поверхню, що оброблюється –  $300 \text{ Н}$ .

Співвідношення числа подвійних ходів деформуючого елемента до частоти обертання заготовки –  $41,18d$ , де  $d$  – діаметр заготовки. Результатом обробки при вищезгаданих змодельованих параметрах є мікрорельєф із наступними геометричними характеристиками: радіус закруглення сферичної частини нерівностей мікрорельєфу опуклої форми – 250...1600 мкм, глибина нерівностей – 60...300 мкм, кількість елементів повністю регулярного мікрорельєфу на одиницю площі – 23...27 шт/мм<sup>2</sup>, кут напрямку розташування елементів – 43°...47°, тип повністю регулярного мікрорельєфу ввігнутої форми – шестикутний. На зовнішній поверхні деталі, яку охоплюють, повністю регулярний мікрорельєф для одержання міцності з'єднання повинен мати такі геометричні параметри: радіус виступів сферичної частини – 250...1600 мкм, висота нерівностей – 60...300 мкм, кут напрямку розташування елементів – 43°...47°, кількість елементів повністю регулярного мікрорельєфу на одиницю площі – 23...27 шт/мм<sup>2</sup>, тип повністю регулярного мікрорельєфу опуклої форми – шестикутний. Його отримують валком для гнуття, на поверхні якого нанесено повністю регулярний мікрорельєф ввігнутої форми. Мікрорельєф на поверхні валка (твердість матеріалу з якого виготовлено валок, HRC 60...64) отримують із режимами обробки, що також оптимізувалися методом симплекс-планування. Були отримані наступні режими: кількість подвійних ходів – 2700 хв<sup>-1</sup>; подача інструмента – 0,6 мм/об; ексцентриситет – 2,5 мм; радіус сфери деформуючого елемента – 2 мм; сила утискування сфери у поверхню, що оброблюється – 250 Н.

Вищезгадані режими обробки дають змогу отримати на поверхні геометричні параметри, що необхідні для отримання максимальної міцності нерухомого з'єднання.

Біметалевий підшипник ковзання: деталь, яка охоплює, (матеріал – сталь 45), та деталь, яку охоплюють, (матеріал – бронза Бр.ОЦС 4-4-2,5). Поверхню охоплюючої деталі, згідно зі способом, вібронакатують при наступних режимах (мікрорельєф ввігнутої форми на внутрішній поверхні деталі, що охоплює): кількість подвійних ходів – 1400 хв<sup>-1</sup>; подача інструмента – 0,4 мм/об; ексцентриситет – 2 мм; радіус сфери деформуючого елемента – 2 мм; сила утискування сфери у поверхню, що оброблюється – 250 Н. Для підвищення міцності цього нерухомого з'єднання на контактуючих поверхнях утворено повністю регулярний мікрорельєф. Деталь, що охоплюють, виготовлена з бронзової заготовки (ДРПНМ 2,2\*75 НД Бр.ОЦС 4-4-2,5). Мікрорельєф утворювався за допомогою загартованого валка (HRC 60...64), на поверхні якого був утворений мікрорельєф. Повністю регулярний мікрорельєф угнутої форми на поверхні загартованого валка отримують вібронакатуванням із режимами обробки: кількість подвійних ходів – 1400 хв<sup>-1</sup>; подача інструмента – 0,4 мм/об; ексцентриситет – 2 мм; радіус сфери деформуючого елемента – 2 мм; сила утискування сфери у поверхню, що оброблюється, – 320 Н. Це дає можливість отримати на зовнішній поверхні деталі, яку охоплюють, повністю регулярний мікрорельєф із такими геометричними параметрами: радіус виступів сферичної частини – 250...1600 мкм, висота нерівностей – 60...300 мкм, кут напрямку розташування елементів – 43°...47°, кількість елементів повністю регулярного мікрорельєфу на одиницю площі – 23...27 шт/мм<sup>2</sup>, тип повністю регулярного мікрорельєфу опуклої форми – шестикутний.

Біметалевий підшипник ковзання: деталь, що охоплює (матеріал – сталь 20Х), та деталь, яку охоплюють, (матеріал – бронза Бр.05Ц5С5). Геометричні параметри повністю регулярного мікрорельєфу повинні відповідати способу, який запатентовано. Поверхню, згідно зі способом, вібронакатують при наступних режимах (мікрорельєф ввігнутої форми на внутрішній поверхні деталі, що охоплює): кількість подвійних ходів – 1400 хв<sup>-1</sup>; подача інструмента – 0,8 мм/об; ексцентриситет – 3 мм; радіус сфери деформуючого елемента – 2 мм; сила утискування сфери у поверхню, що оброблюється, – 310 Н.

Співвідношення числа подвійних ходів деформуючого елемента до частоти обертання заготовки –  $41,18d$ , де  $d$  – діаметр заготовки. Результатом обробки при вищезгаданих змодельованих параметрах є мікрорельєф із наступними геометричними характеристиками: радіус закруглення сферичної частини нерівностей мікрорельєфу опуклої

форми – 250...1600 мкм, глибина нерівностей – 60...300 мкм, кількість елементів повністю регулярного мікрорельєфу на одиницю площі – 23...27 шт/мм<sup>2</sup>, кут напрямку розташування елементів – 43°...47°, тип повністю регулярного мікрорельєфу ввігнутої форми – шестикутний. На зовнішній поверхні деталі, яку охоплюють, повністю регулярний мікрорельєф для одержання міцності з'єднання повинен мати такі геометричні параметри: радіус виступів сферичної частини – 250...1600 мкм, висота нерівностей – 60...300 мкм, кут напрямку розташування елементів – 43°...47°, кількість елементів повністю регулярного мікрорельєфу на одиницю площі – 23...27 шт/мм<sup>2</sup>, тип повністю регулярного мікрорельєфу опуклої форми – шестикутний. Його отримують валком для гібки, на поверхні якого нанесено повністю регулярний мікрорельєф ввігнутої форми. Мікрорельєф на поверхні валка (твердість матеріалу з якого виготовлено валок, НРС 60...64) отримують із режимами обробки, що також оптимізувалися методом симплекс-планування. Були отримані наступні режими: кількість подвійних ходів – 2700 хв<sup>-1</sup>; подача інструмента – 0,6 мм/об; ексцентриситет – 2,5 мм; радіус сфери деформуючого елемента – 2 мм; сила утискування сфери у поверхню, що оброблюється, – 250 Н.

Вищезгадані режими обробки дають змогу отримати на поверхні геометричні параметри, що необхідні для отримання нерухомого з'єднання з максимальною міцністю. Накопичення та обробку статистичних даних можливо здійснювати за допомогою програмного продукту Excel чи Access. Матиматичне моделювання – при підтримці програмного продукту Matlab.

Таким чином, отримано геометричні параметри мікрорельєфу, що забезпечують підвищення міцності нерухомого з'єднання, оптимізовані режими утворення повністю регулярного мікрорельєфу з бажаними геометричними параметрами на поверхні та підтвердження того, що обраний метод проведення досліджень вірний. Його можливо застосовувати як при проведенні експериментів, так і в практиці. Він дозволяє значно скоротити час, що витрачається на проведення дослідження та на розробку технологічного процесу нанесення повністю регулярних мікрорельєфів.

Після отримання на контактуючих поверхнях повністю регулярних мікрорельєфів, втулки збирали, а з'єднання дорнували. Дорнування можливо проводити на будь-якому промисловому пресі, що здатен забезпечити необхідне зусилля втискання та має необхідні пристрої.

Наявність на одній поверхні повністю регулярного мікрорельєфу опуклої форми, а на спряженій поверхні повністю регулярного мікрорельєфу ввігнутої форми, дозволяє при дорнуванні здійснювати зчеплення з максимальною площиною контактуючих поверхонь. Та частина повністю регулярного мікрорельєфу опуклої форми, що не увійшла у западини повністю регулярного мікрорельєфу ввігнутої форми, при дорнуванні деформується, що призводить до зменшення висоти опуклого мікрорельєфу та збільшення радіусів. Як наслідок, підвищується площа контакту та збільшується міцність з'єднання.

Для підвищення зносостійкості поверхні підшипника, що працює в умовах тертя, на поверхню наносили частковорегулярний мікрорельєф, що виконував роль “змащувальних кишень”. Процес нанесення частковорегулярного мікрорельєфу поєднано із процесом дорнування. Дорнування здійснюється дорном нової конструкції, що дозволяє одночасно з дорнуванням наносити регулярний мікрорельєф та покращувати якість поверхні за рахунок зменшення напливів, що виникають. Процес дорнування та розроблений інструмент схематично зображено на рисунку 1. Дорн – інструмент, який має неріжучі кільця - зуби, що утворюють новий мікрорельєф вигладжуванням. Утворений мікрорельєф є дзеркальним відбитком вигладжуючої поверхні дорна. Сконструйований дорн 1 складається з передньої замкової частини 2, шийки 3, передньої направляючої частини 4, робочої частини, яка має деформуючі 5, калібруючі 6 та кінцеві зуби 7, задньої замкової частини 8. Зуб дорна має забірну та зворотню поверхні у вигляді конусів та циліндричною частиною проміжних. Профіль зуба у перерізі, що перпендикулярний до напрямку складного руху деформуючого інструмента, – коло. Мікрорельєф утворюють за допомогою інденторів, які розташо-

вані на останній калібруючій стрічці 9 по колу. Кількість їх залежить від діаметра деталі, що дорнується. Радіус інденторів 10, що утворюють мікрорельєф, – 3...4мм. Крім цього, дорн споряджено згладжуючою стрічкою 11 для усунення напливів, що виникають. Відстань, на якій розташована стрічка, обов'язково повинна бути не менш ніж 15 мм.

Цей розмір обрано з урахуванням того, що висота напливів дуже мала, а процес дорнування супроводжується таким явищем, як хвиля деформації. Тому дуже важливо розташовувати стрічку поза зоною деформації для ефективного усунення напливів. Діаметр згладжуючої стрічки 11  $D_{стр}$  повинен відповідати нерівності:

$$D_{отв} \leq D_{стр} < D_{отв} + h_m,$$

де  $D_{отв}$  - отримуваний діаметр отвору, мм;

$D_{стр}$  – діаметр згладжуючої стрічки, мм;

$h_m$  – глибина канавок отриманого мікрорельєфу, мм.

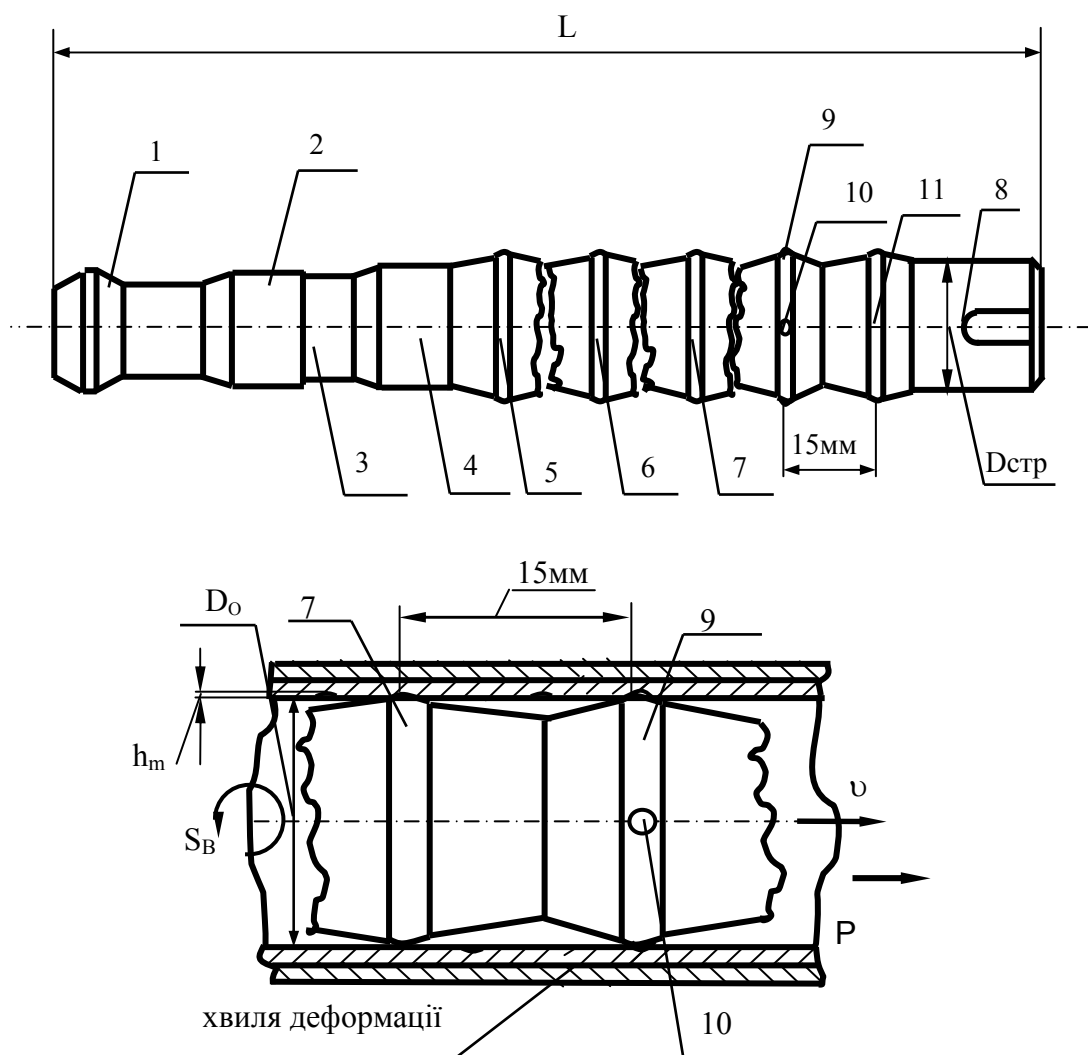


Рис.1 Схематичне зображення інструмента та процесу обробки поверхні дорном з одночасним нанесенням мікрорельєфу

Одночасно стрічка, крім усунення напливів, буде змінювати геометричні параметри отримуваних канавок. Нова форма канавок буде сприяти підвищенню експлуатаційних властивостей внаслідок покращення затримання та виводу продуктів зносу за

межі підшипника. Режими обробки поверхні такі: зусилля дорнування  $P$ , швидкість дорнування  $v$ , подача  $S_B$ . Отримувані параметри виробу: діаметр отвору  $D_0$ , глибина канавок мікрорельєфу  $h_M$ .

Дорнування здійснювали при таких технологічних режимах:

натяг	$i=0,5$ мм,
швидкість дорнування-	$V=15$ м/хв,
сила тяги	$P=23$ кН,
мастило	масло “Індустріальне”,
подача	$S_B=4$ мм/об.

Параметри отвору, що дорнують:

діаметр, що отримуємо,	$D_{\text{отв}}=80$ мм;
довжина отвору	$L_{\text{отв}}=100$ мм;

Зусилля дорнування, а отже, і діаметр дорну, обчислюється з урахуванням сил, що виникають при нанесенні частково-регулярного мікрорельєфу.

**Висновки.** Варіюючи технологічними параметрами на поверхні, можливо утворювати частковорегулярний мікрорельєф різних типів з відносною площиною нерівностей у діапазоні від 3% до 97%. Частковорегулярний мікрорельєф різних типів отримується завдяки наданню додаткового обертального руху дорну навколо своєї осі. Але оптимальними значеннями для поверхонь, що працюють в умовах тертя, є величина відносної площини нерівностей ( $F_k$ ) у межах 25-45 %.

Запропонований технологічний процес із застосуванням розробленого дорна дозволяє підвищити зносостійкість виробу за рахунок утворення частковорегулярного мікрорельєфу у 1,25-1,5 рази, а також підвищити міцність з'єднання у порівнянні зі з'єднаннями, де контактують обточені та шліфовані поверхні, поверхні з частковорегулярними мікрорельєфами та іншими комбінаціями методів обробки контактуючих поверхонь (при однакових натягах) у 1,4-1,7 рази.

*The method of the practical employment of mathematical modelling for searching the geometrical parameters of fully new regular microrelief, which enables to provide the necessary service properties of the surface, and the way, how to optimised the rates of machining were described in this article. The aim of the mathematical modelling optimisation has been a surfaces, that can provides the increasing of straightness of fixed joint. The fully new regular microreliefs are producing according to the method, which had been developed by Shneyder Y. — vibrodinamical roll forming. The results of the calculation were checking in conditions, which are near-to-real. Some other examples of optimisation are describing too. The practical employment of the results make it possible to increase the straightness of the fixed joints.*

### Література

1. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: Справочник. – СПб.: Политехника, 1998. – 414 с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 311 с.
3. Гавриш А.П., Киричок П.О., Підберезний М.П. Зміцнення металевих поверхонь деталей та механізмів. – К.: Наукова думка. 1995 – 174 с.

Одержано 12.06.2002 р.