

УДК 539.3

Ткачук М.А., Шеремет В.М., Ткачук Г.В., Грабовський А.В.

**РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ СПРИЯТЛИВИХ
ПОВЕРХНЕВИХ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНИХ ПОЛІВ НАПРУЖЕНЬ
У ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТАХ МАШИН**

Вступ. При розробці принципово нових технологій однією з основних є проблема пошуку оптимального рішення у нечітко визначеному та варійованому просторі чинників, при нечітких критеріях, обмеженнях та власне при невизначених характеристиках самого технологічного процесу. Це стосується також і в першу чергу науково-технічної проблеми розробки ефективних технологій поверхневого зміцнення високонавантажених елементів машин (ВЕМ), що перебувають у рухомому контакті. Як відомо, традиційні технології розв'язання даної проблеми мають цілу низку принципових недоліків, серед яких – накопичення небажаних залишкових деформацій деталі або вузла і неефективне поєднання механічних характеристик матеріалу у поверхневому шарі та у глибині матеріалу, з якого виготовлено елемент, що зміцнюється. Важливо і те, що традиційні технології можуть поліпшуватися в основному тільки за рахунок компромісних, а не оптимізаційних процедур. Вихід з цієї ситуації – відмова від жорсткої регламентації чинників, пошук принципово нових фізико-механічних процесів та оптимізація їх впливу на комплекс критеріїв, що визначають характеристики поверхневого зміцнення ВЕМ. Проте для реалізації даного підходу потрібно, по-перше, розробити теоретичну основу, математичний апарат для багатоваріантного дослідження та оптимізації характеристик стану поверхневого шару в поєднанні зі станом матеріалу на глибині, а, по-друге, власне провести із застосуванням розроблених підходів процес досліджень та синтезу схеми і параметрів нової технології. Для цього потрібно розв'язати наступні нові наукові проблеми та прикладні задачі.

1. Розробка нових теоретико-множинних підходів до генерації математичних, числових та фізичних моделей досліджуваних та створюваних технологій, а також станів зміцнюваних елементів машин, що характеризуються єдиним способом опису, пристосованістю до роботи з нечіткими, поповнюваними та зменшуваними множинами чинників, а також інтегрованістю у сучасні методи наукового дослідження.

2. Реалізація розробленого підходу у комплексній математичній моделі дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів машин, що перебувають у стані контактної взаємодії.

3. Розробка спеціалізованого програмно-модельного комплексу для числових досліджень НДС тіл складної форми, структури, що природним чином інтегрується у сучасні системи комп'ютерного моделювання.

4. Формування потужного програмно-апаратного комплексу (ПАК), що володіє

здатністю розв'язувати масштабні науково-технічні задачі, які виникають при багатоваріантних дослідженнях фізико-механічних процесів у системах з багатомільйонною кількістю невідомих.

5. Аналіз НДС елементів досліджуваних машин, поверхні яких оброблені за новою технологією зміцнення [1-5], та розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо технологічних режимів запропонованого технологічного процесу.

Оскільки перелічені наукові проблеми і задачі є новими, актуальними і важливими для широкого класу задач, які на даний час стоять перед механікою, технологією машинобудування та машинознавством, то для їх розв'язання були залучені самі передові теоретичні, комп'ютерно-інформаційні та апаратні розробки, системи та засоби.

1. Розробка теоретико-множинного підходу до генерування моделей фізико-механічних процесів і станів складних та надскладних механічних систем. Якщо розглядати проблему розробки нових технологій поверхневого зміцнення високонавантажених елементів машин як одну із складових дослідження, аналізу та синтезу елементів складних та надскладних механічних систем, то можна вичленити загальні риси: з одного боку, наявність великої кількості інструментів досліджень НДС та інших станів та фізико-механічних процесів, а з іншого боку – принципові труднощі, що постають при розв'язанні багатоваріантних задач параметричного або структурного аналізу, а тим більше – синтезу. Варто відзначити, що найбільш потужним методом досліджень реакції складних механічних систем на зовнішні дії є метод скінченних елементів (МСЕ) [6].

МСЕ на даний час досягнув достатньої глибини теоретичного обґрунтування. Він реалізований у вигляді сучасних програмних пакетів (ANSYS, NASTRAN), які володіють широкими функціональними можливостями для побудови скінченно-елементних моделей (СЕМ), для моделювання різноманітних фізико-механічних процесів, а також розвиненими засобами постпроцесінгу. Крім того, засоби скінченно-елементного моделювання інтегруються в системи автоматизованого проектування (Pro/ENGINEER, CATIA, SolidWorks та ін.). Це дозволяє розв'язувати не тільки задачі аналізу НДС, але й окремі задачі синтезу. Зокрема, досить просто організовуються: аналіз чутливості до зміни конструктивних параметрів, параметричний аналіз, параметрична оптимізація. Але можливості аналізу та синтезу вичерпуються, як тільки виникає задача структурного синтезу або побудови оптимізаційних процедур на множинах, що задаються системою складних обмежень та зв'язків [7]. Наступне затруднення – непристосованість існуючих систем комп'ютерного проектування, аналізу та синтезу до оперування з даними, що важко формалізуються. І, нарешті, існує проблема взаємозв'язку в системі „проектант – програмний комплекс”. Як правило, для дослідження складних та надскладних механічних систем необхідно залучати висококваліфікованих дослідників, що досконало володіють тим чи іншим програмним продуктом. На практиці ж потрібне оперативне проведення великої кількості досліджень, причому дослідниками, які є фахівцями у загальних питаннях проектування та розробки технологій.

Особливо ситуація загострюється в процесі проектування нових машинобудівних конструкцій та технологій їх зміцнення, коли всі наведені вище обставини діють у сукупності. У [7] описана розробка загального методу опису розрахункових моделей складних та надскладних механічних систем, що природним чином враховують кількісні, якісні, структурні характеристики досліджуваних об'єктів. Крім того, запропонована структура інтегрованої системи автоматизованого аналізу НДС та синтезу складних конструкцій на основі поєднання геометричного, скінченно-елементного моделювання та врахування специфічних особливостей виробів, що проектуються, а також технології, що створюються.

Перша і ключова із означеного переліку задач пропонується до розв'язання із залученням розробленого і описаного у низці статей [7, 8] методу узагальненого параметричного опису при дослідженні характеристик міцності та жорсткості елементів складних

механічних систем. Основна ідея розширеного параметричного підходу полягає в тому, що реалізований у системах CAD/CAM/CAE звичайний параметричний підхід при використанні спеціалізованих модулів може бути розширений. Дійсно, у межах цих модулів зручно організувати не тільки тривіальну параметризацію, але і прийняти як узагальнені параметри, наприклад, структуру розрахункової моделі, конструктивне рішення, тип скінченно-елементної розбивки, способи реалізації сполучення елементів складної механічної системи. При цьому не потрібно створення спеціальної метамови, що формалізує зазначений опис моделі. Для того чи іншого класу конструкції, виходячи з досвіду проектування, виготовлення і дослідження, будується внутрішній алгоритм, що за простим набором вхідних даних здійснює побудову набору інструкцій на мові команд систем CAD/CAM/CAE/PDM високого рівня для створення відповідної моделі [7].

Запропонована схема дає можливість не тільки оперувати з даними, що важко формалізуються, але також враховувати складні системи зв'язків між ними. Це, у свою чергу, дозволяє організувати процедуру цілеспрямованого перебору варіантів досліджуваних об'єктів. Найважливішою особливістю і перевагою запропонованого підходу є нечутливість до типу, вигляду і складу множини узагальнених параметрів P . Таким чином, як узагальнені параметри можуть виступати не тільки кількісні (як у традиційному підході), але і якісні параметри. Крім того, сам склад множини P може бути узагальненим параметром, що варіюється. При цьому важливо те, що при використанні даної технології не потрібна переробка створюваної системи автоматизованого аналізу та синтезу елементів складних механічних систем. Спеціальний модуль вбудовується у вже функціонуючу систему і надає їй нових якостей.

В той же час при цьому виникає інша проблема: в процесі автоматизованого проектування елементів складних та надскладних механічних систем виникають задачі забезпечення достовірності розрахункових схем, вживаних для дослідження їх НДС. Застосування розрахункових схем в МСЕ вимагає як початкових даних знання параметрів скінченно-елементного розбиття досліджуваних об'єктів, граничних умов і навантажень. Точність початкових даних забезпечує високу точність числових результатів. У подальшому при їх використанні в спеціалізованих інтегрованих системах автоматизованого аналізу і синтезу елементів складних механічних систем забезпечується і точність досліджень, і високі характеристики проєктованих виробів.

Існуючі на даний час числові методи дослідження НДС, серед яких провідне положення займає МСЕ, не забезпечують лише за рахунок внутрішніх засобів контроль точності результатів моделювання порівняно з поведінкою реальних об'єктів. Актуальною стає задача забезпечення достовірності використовуваних розрахункових схем при числовому дослідженні елементів складних механічних систем. В роботі пропонується використати розрахунково-експериментальний метод (РЕМ) досліджень, при використанні якого як основний результат виступають достовірні і точні розрахункові моделі досліджуваних об'єктів. Він базується на поєднанні можливостей МСЕ і методів експериментальних досліджень [8, 9] та опирається на потенційні можливості узагальненого параметричного опису [7].

Технологія розрахунково-експериментального дослідження елементів складних механічних систем, що пропонується, має характерні наступні особливості [8, 9].

1. Запропонований РЕМ дає можливість організувати процес розрахунково-експериментальних досліджень, що самокоригується, основним результатом якого є достовірна розрахункова параметрична модель елементів складних механічних систем; усуває протиріччя, що витікає з лінійного характеру процесу досліджень в традиційній їх постановці.

2. Розроблена технологія розрахунково-експериментальних досліджень вбудо-

вується в цикл проектування, дослідження, технологічної підготовки виробництва і виготовлення на вітчизняних підприємствах.

3. Запропонована схема визначення значимих чинників розрахункових моделей елементів складних механічних систем за результатами експериментальних досліджень. Для вивчення впливу конструктивних, технологічних і експлуатаційних параметрів на НДС найбільш навантажених і відповідальних деталей пропонується проводити комплекс експериментальних досліджень, в яких при варіюванні умов визначається реакція досліджуваного об'єкту. При цьому представляється можливою побудова збалансованих розрахункових моделей елементів механічних систем з необхідним рівнем деталізації.

Таким чином, запропоновано узагальнений параметричний метод опису, що дозволяє забезпечити єдиний підхід до проектування і дослідження елементів складних механічних систем та технологій їх зміцнення.

Розроблений напрямок інтенсифікації досліджень покладено в основу для створення сімейств спеціалізованих систем проектування, дослідження і виготовлення елементів машинобудівних конструкцій та методів їх зміцнення. Математична модель теж базується на основі застосування узагальненого параметричного підходу [7, 8], а дискретизація здійснюється методом скінчених елементів [6] з доповненим параметричним описом [7, 8]. При цьому узагальнена математична модель для дослідження міцнісних і жорсткісних характеристик елементів високонавантажених машин, що пропонується, поєднує всі етапи синтезу параметрів технологічного процесу. Задача синтезу розрахункових моделей елементів машин і технологій їх зміцнення отримала повну математичну формалізацію. Достовірність розрахункових моделей високонавантажених елементів машин забезпечується поєднанням переваг комплексу аналітичних, числових і експериментальних методів. Цим самим удається замкнути цикл РЕМ, отримавши не лише конкретні результати для конкретної задачі, але також достовірну числову модель.

Таким чином, описаний підхід після формалізації основних етапів досліджень за допомогою відповідного математичного апарату реалізований у вигляді скінченного числа задач. Для переходу до розв'язання конкретних задач розроблені методи мають бути реалізовані у вигляді відповідного ПАК (див. нижче). Також отримала математичне формулювання і розв'язана у загальному вигляді задача обґрунтованого вибору параметрів числових моделей досліджуваних елементів і технологій за критеріями міцності, жорсткості і зносостійкості.

2. Програмно-апаратний комплекс «Політехнік-125» для аналізу та синтезу моделей елементів складних механічних систем та технологій. Для сучасного стану числових методів, програмного і апаратного забезпечення для дослідження, аналізу та синтезу елементів складних механічних систем з урахуванням НДС характерні: високий ступінь розвитку математичних моделей для дослідження різних фізико-механічних процесів; наявність формального апарату числового розв'язання виникаючих задач (методи, алгоритми); велика різноманітність програмних пакетів, що потенційно мають “практично необмежені” можливості для розв'язання виникаючих в реальних умовах задач. У той же час спроби побудувати “універсальні” інструментальні засоби для розв'язання задач, що диктуються потребами сучасного машинобудування, наштовхуються на низку обмежень.

Перш за все це обмеження ресурсні. Дійсно, спроби розв'язання задач вищої за середню складності (наприклад, з множиною зон контакту, зв'язані задачі, нестационарні динамічні процеси, фізично або геометрично нелінійні процеси деформації, ударна взаємодія) в інтегрованих CAD/CAM/CAE-продуктах або навіть в спеціалізованих CAE-системах вимагають часто таких обсягів ресурсів, які у розпорядженні дослідників відсутні. Це стосується і часу розв'язання, і обсягу оперативної пам'яті, і обсягу дискової пам'яті.

Нижче описаний процес створення спеціалізованого програмно-апаратного комплексу для розрахунково-експериментального дослідження елементів складних механічних систем, що дає змогу переступити ці обмеження. До нього були пред'явлені наступні вимоги: модульний принцип побудови; наявність єдиної бази даних; відкритість архітектури; модифікованість та розширюваність; максимальна автоматизація процесів досліджень; "настроюваність на масштаб" виникаючої задачі.

3. Структура та схема функціонування програмно-апаратного комплексу.

Запропонована технологія досліджень реалізована у вигляді спеціалізованого програмно-апаратного комплексу (СПАК) (рис. 1). Використовуючи єдиний формат даних, носії інформації і єдину технологію роботи з інформацією, на основі узагальненого параметричного підходу будеться робота з моделями та масивами даних.

Цей ПАК розгорнений на базі центру „Тензор” НТУ „ХП” [Tensor.kharkiv.com, tensor@online.kharkiv.ua] і є по суті першим в Україні СПАК з такими можливостями. Він побудований на базі методу узагальненого параметричного опису складних механічних систем, об'єднує спеціалізовані та універсальні програмні модулі. Використання спеціалізованих програмних модулів дозволяє доповнити сучасні потужні комп'ютерні системи проектування і аналізу накопиченим досвідом, знаннями і урахуванням специфіки виробів, що проектуються, а також технологій, що створюються. При цьому об'єднуються тенденції універсалізації, можливостей інтелектуалізації моделей і спеціалізації їх спрямованості.

Запропонований підхід поєднує переваги параметричного моделювання, універсальності та урахування специфіки досліджуваних конструкцій, спеціалізованого програмного забезпечення, а також класичного методу скінченних елементів.

При оснащенні створюваного ПАК програмним забезпеченням враховувалися наступні чинники: максимальні функціональні можливості програмного забезпечення; безпроблемність обміну даними; відповідність потреб програмного забезпечення можливостям апаратного забезпечення; можливість використання ліцензійного програмного забезпечення в наукових дослідженнях і навчальному процесі. У зв'язку з цим в склад ПЗ були включені наступні програмні комплекси: Pro/ENGINEER, Nastran, LS-DYNA, SolidWorks та спеціальне програмне забезпечення. Комплексу даних вимог відповідає апаратне забезпечення: обчислювальний комплекс 64-розрядних машин, об'єднаних у кластер „Політехнік-125” з кількістю вузлів 16 (по 4 ядра, пам'ять – 128 Гб); система 2-процесорних вирішувачів на базі процесорів XEON, Pentium та Opteron; система введення графічної інформації в комп'ютер; засоби зберігання великих об'ємів даних на магнітних та оптичних носіях. Створений програмно-апаратний комплекс забезпечує розрахунково-експериментальне дослідження НДС елементів складних механічних систем практично будь-якого ступеня складності в короткі терміни.

Таким чином, розглядаючи і об'єкт опису (елементи деталей і технологій), і інструмент моделювання (CAD/CAM/CAE/PDM-систему), і процес створення цього інструменту з системної точки зору, а також ґрунтуючись на аналізі структури і спрямувань інформаційних процесів і потоків, можна визначити як найбільш значиму розробку на базі запропонованого підходу і математичного апарату спеціалізованих підсистем створення моделей високонантажених елементів машин і технологій їх зміцнення, природним чином інтегрованих в створювані спеціалізовані інтегровані системи автоматизованого аналізу і синтезу,



Рисунок 1 – Загальна схема аналізу та синтезу елементів складних механічних систем

а також апаратного забезпечення з широкими можливостями.

Запропонована технологія створення структури спеціалізованих інтегрованих систем автоматизованого аналізу і синтезу може бути застосована для дослідження елементів складних механічних систем різного типу. Запропонований принцип дозволяє проводити побудову метасистем автоматизованого проектування. У даній роботі він застосований для дослідження і відпрацювання технології зміцнення ВЕМ.

4. Аналіз напружено-деформованого стану елементів досліджуваних машин, поверхні яких оброблені за новою технологією зміцнення, що пропонується у роботі, та розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо технологічних режимів запропонованого технологічного процесу. Ґрунтовна теоретична база методу узагальненого параметричного моделювання складних та надскладних механічних систем, що запропонована та реалізована у роботі у вигляді сучасного потужного програмно-апаратного комплексу, дає змогу перейти до постановки та розв'язання власне проблеми дослідження та обґрунтування схем і параметрів технологічних процесів зміцнення поверхонь високонавантажених машин.

Як відомо, проблема зміцнення поверхонь високонавантажених елементів машин за традиційними „об'ємними” або „поверхневими” технологіями приводить до протиріччя між вартістю, енергоємністю, якістю, може призводити до непрацездатності конструкції і т.д. Тому на розвиток цих методів у роботах [1-5] була запропонована принципово нова технологія дискретно-континуального зміцнення поверхневого шару ВЕМ. На рис. 2 наведена схема нанесення зміцнюючих зон (на прикладі опорної частини вала), а на рис. 3 – параметри технологічного процесу.

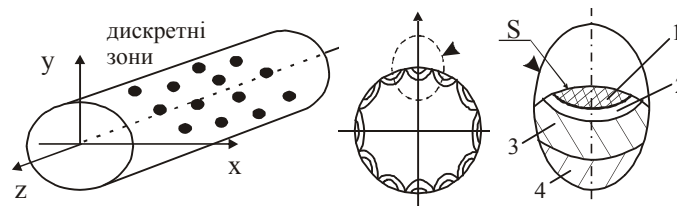


Рисунок 2 – Схема нанесення та характерні зони при дискретно-континуальному зміцненні (S – поверхня зміцнення): 1 – дискретна зона зміцнення – зона «білого металу»; 2, 3 – перехідні зони; 4 – основний матеріал

Як видно з металографічних досліджень [1-5], на поверхні зміцнення S (див. рис. 2, 3) в тіло основного металу 4 вкраплюється високолегований метал (1 – дискретна зона зміцнення – ДЗМ – діаметром d та глибиною h).

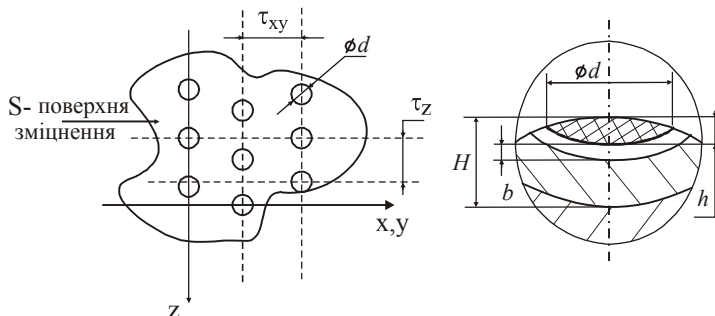


Рисунок 3 – Параметри технологічного процесу

По товщині далі йде тонка зона „білого металу” (ЗБМ) товщиною b , перехідна зона глибиною H . Розміщення ДЗМ на поверхні S характеризується кроками τ_{xy} в окружному напрямі та τ_z в осьовому. При цьому щільність покриття поверхні S (так званий коефіцієнт дискретності) визначається залежністю $f = \pi d^2 / 4 \tau_{xy} \tau_z$. Властивості матеріалів: E_i, ν_i ($i = 1, 2, 3, 4$) – відповід-

но модулі пружності та коефіцієнти Пуассона (номери відповідають позначенням на рис. 2); аналогічна нумерація для σ_T^i, σ_b^i – границі текучості та границі міцності матеріалів. Таким чином, наочний перелік параметрів технологічного процесу дискретно-континуального зміцнення – $P = \{d, \tau_z, \tau_{xy}, E, \nu, \sigma_T, \sigma_b, h, b, H\}$, де $E, \nu, \sigma_T, \sigma_b$ – це вся сукупність індексованих за номером матеріалу фізико-механічних та механічних властивостей матеріалів.

На першому етапі дослідження визначається характер НДС в області окремої дискретної зони зміцнення. На рис. 4 проілюстрована розрахункова схема для визначення осесиметричної картини НДС в області ДЗЗ, на рис. 5 – скінченно-елементна модель з 1,5 млн. вузлів та 403 тис. елементів, що побудована для проведення досліджень.

Якісні картини компонент НДС при співвідношенні модулів пружності $\alpha_1 = E_1 / E_4 = 1,2; \alpha_2 = E_2 / E_4 = 1,1; \alpha_3 = E_3 / E_4 = 1,0; \beta_1 = \nu_1 / \nu_4 = 1,0; \beta_2 = \nu_2 / \nu_4 = 1,0; \beta_3 = \nu_3 / \nu_4 = 1,0$ наведені на рис. 6. Видно, що профіль деформованої поверхні сприятливий для роботи у процесі контактної взаємодії, оскільки при цьому контактний тиск перерозподіляється, збільшуючись в області легованого матеріалу та зменшуючись при віддаленні від нього. Враховуючи, що мікропрофіль поверхні в області ДЗЗ набагато якісніший, ніж в іншому спряженні (тобто основного матеріалу 4, див. рис. 2), отримуємо ефект не тільки зміцнення, але й покращення умов тертя. Даний ефект, тут названий Δ -ефект, є відносно стабільним при зміні контактного тиску, тобто чим більший тиск, тим більше деформується тіло деталі, тим бі-

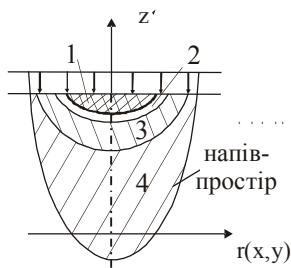


Рисунок 4 – Розрахункова схема для визначення НДС в області окремої ДЗЗ

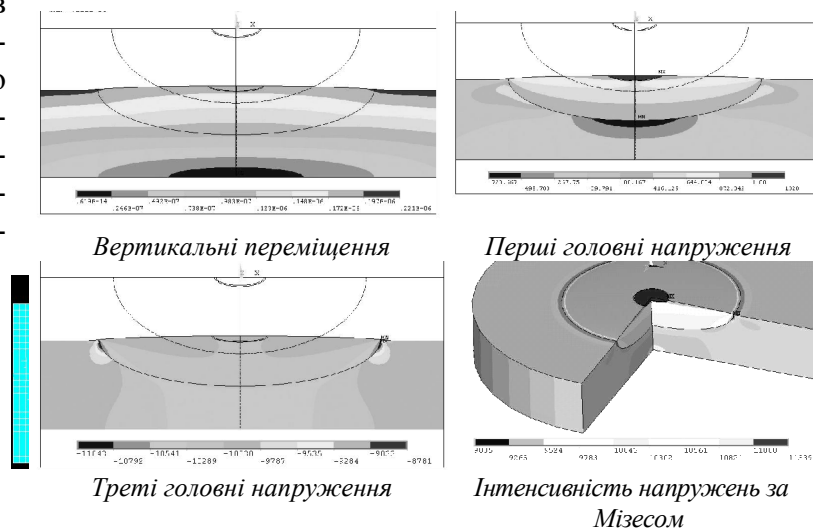


Рисунок 6 – Компоненти НДС в області ДЗЗ

льший ефект перерозподілу зусиль контактної взаємодії на користь переважного спряження з ДЗЗ.

Для аналізу впливу різних факторів на НДС реальних конструкцій, що піддані дискретно-континуальному зміцненню, побудовано просторову СЕМ фрагменту приповерхневої частини опорної частини валу, що підданий дискретно-континуальному зміцненню. Оскільки для повного моделювання опорної частини валу потрібна надто велика (сотні мільйонів ступенів вільності) СЕМ, то було визначено репрезентативну множину ДЗЗ, що входить до складу відповідного секторного вирізу (рис. 7).

На рис. 8 – типова картина розподілу вертикальних переміщень вздовж відрізка прямої, що проходить через центри ДЗЗ. Видно, що спостерігається та ж картина переміщень, що й у випадку одиничних ДЗЗ, але з періодом

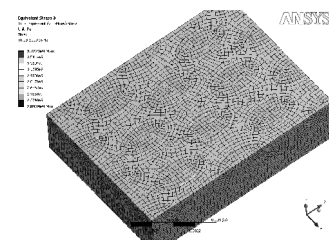


Рисунок 7 – СЕМ підповерхневого шару опорної частини валу та еквівалентні напруження за Мізесом

повторення, який дорівнює кроку розміщення дискретних зон зміцнення. Кількість варійованих параметрів P технологічного процесу у даному випадку довільна, сама множина P може бути поповнювана. Це є надзвичайно важливою перевагою запропонованого теоретичного підходу до розв'язання задачі. Крім того, математична модель дозволяє досліджувати всі аспекти НДС, а скінченно-елементна модель відтворює усі переваги запропонованого підходу. Кількість скінченних елементів навіть для окремого секторного вирізу валу досягає кількох мільйонів одиниць ступенів вільності.

Тому для дослідження НДС об'єкту, що представлений на рис. 7, потрібні великі обчислювальні ресурси, які забезпечує створений і описаний раніше програмно-апаратний комплекс. Саме ці обставини дали можливість провести комплекс досліджень, деякі початкові результати яких представлені на рис.8.

Ще більші ресурсні вимоги – при повномасштабному моделюванні макрочастини деталі або деталі повністю. При цьому на перший план виступає проблема різномасштабності зон, що досліджуються: від кількох мікронів до метрів. Для узгодження сіток скінченних елементів потрібно розробити та застосувати спеціальні алгоритми.

Як видно із попереднього порівняльного аналізу одержаних розподілів компонентів НДС, збільшення відносної жорсткості матеріалу зміцнення сприяє посиленню позитивного впливу виявленого Δ -ефекту зміцнення та збільшення стійкості поверхні S до зношування. Що стосується впливу параметру f , то спостерігається «зона w » ($f^w \in [0,6; 0,8]$), при попаданні коефіцієнту дискретності в котрий Δ -ефект найбільш дієвий.

Як показав аналіз напруженого стану опорної частини валу, крім виявленого Δ -ефекту, значення має ще й названий так « σ -ефект». Він полягає в тому, що при сумісному деформуванні розплавленого матеріалу ДЗЗ створюється залишковий напружений стан, який при суперпозиції з напруженим станом від дії тиску P дає ефект зменшення рівня результуючих напружень. Первинний аналіз показує, що найбільший « σ -ефект» досягається в діапазоні $f \in [0,5 \div 0,8]$. Таким чином, співставлення « Δ -ефекту» та « σ -ефекту» дає змогу визначити рекомендований інтервал параметру дискретності покриття: $f^* \in [0,65 \div 0,75]$.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що в результаті комплексу пробних досліджень обґрунтовані раціональні параметри запропонованого технологічного процесу дискретно-континуального зміцнення високонавантажених елементів машин, механізмів і окремих деталей.

Висновки та рекомендації за результатами досліджень. Описані у роботі нові теоретичні розробки, створені математичні моделі, унікальні програмно-моделні та програмно-апаратні комплекси, а також власне результати числових досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Запропоновані у роботі нові теоретичні основи узагальненого параметричного методу моделювання фізико-механічних процесів у складних та надскладних механічних системах створюють потенційні можливості для глибокого аналізу та синтезу нових технологій зміцнення високонавантажених елементів машин різного призначення.

2. Розроблені комплексні математичні та скінченно-елементні моделі характеризуються адаптованістю до аналізу та синтезу принципово нових способів зміцнення елементів високонавантажених машин, що якісно відрізняє їх від побудованих тради-

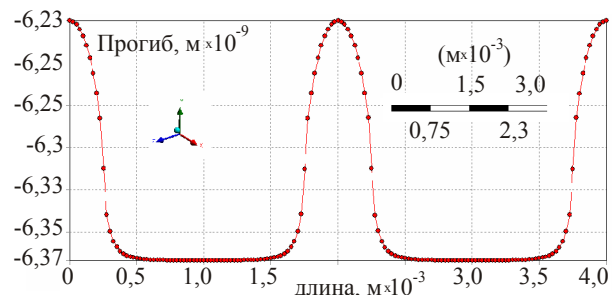


Рисунок 8 – Картина переміщень поверхні деталі

ційними способами.

3. Крім наукового забезпечення, у роботі проведена їх програмно-модельно-апаратна реалізація, що дало змогу провести комплекс багатоваріантних досліджень зміцнених високонавантажених елементів машин із застосуванням моделей із кількістю ступенів вільності кілька мільйонів.

4. Розроблене теоретико-множинне математичне та програмне забезпечення у процесі досліджень дозволило виявити 2 ефекти, названі « Δ -ефект» та « σ -ефект». Перший з них полягає у позитивному характері зміни деформованого профілю у контакті зміцнюваного елемента машини зі спряженими елементами. Другий ефект полягає у створенні сприятливого залишкового напруженого стану після зміцнення досліджуваного об'єкту із застосуванням нової дискретно-континуальної технології, який після накладення на розподіл робочих напружень створює такий результуючий напружений стан, що значно дальший від небезпечного рівня, ніж для незміцнених деталей машин.

5. Комплексне дослідження НДС високонавантажених елементів машин, зміцнених за допомогою нової запропонованої технології, дало змогу отримати якісні та кількісні залежності деяких параметрів та визначити рекомендовані інтервали для їх вибору.

Таким чином, наукові дослідження та числове моделювання продемонстрували новизну та ефективність підходів та моделей, а також позитивність результатів. В кінцевому результаті при масштабних дослідженнях можуть бути обґрунтовані параметри технології дискретно-континуального зміцнення.

У подальших дослідженнях планується більш детально визначити напружено-деформований стан дискретно зміцнених деталей із застосуванням запропонованого підходу, методів, моделей, алгоритмів та програмно-модельного комплексу, а також розробити обґрунтовані рекомендації щодо вибору параметрів технологічного процесу.

Литература: 1. Гончаров В.Г. Повышение износостойкости коленчатых валов форсированных дизелей большой мощности / В.Г. Гончаров, Э.К. Посвятенко, С.С. Дяченко // Резание и инструмент в технологических системах. – 2009. – Вып. 77. – С. 53–65. 2. Гончаров В.Г. Повышение износостойкости трибосистем / В.Г. Гончаров, Б.В. Савченков // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. Харьк. нац. авт.-дор. ун-та. – X., 2003. – Вып.13. – С. 117–119. 3. Гончаров В.Г. Исследование изменения характеристик трения по глубине дискретного слоя / В.Г. Гончаров, А.К. Олейник, Г.Г. Гринченко // Зб. наук. пр. Запорізьк. нац. техн. ун-ту. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – С. 100–101. 4. Влияние режимов дискретного упрочнения на эксплуатационные свойства деталей автомобилей / Б.В. Савченков, В.Г. Гончаров, Н.Г. Александров и [др.] // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. Харьк. нац. авт.-дор. ун-та. – X., 2005. – Вып.16. – С. 83–85. 5. Гончаров В.Г. Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: Автореф. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / В.Г. Гончаров: Харьк. нац. авт.-дор. ун-т. – X., 2008. – 19 с. 6. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 7. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д. и [др.] // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79. 8. Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных схем / Ткачук Н.А., Веретельник Ю.В., Миргородский Ю.Я. и [др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПП”. – 2004. – № 2, т. 2. – С.79-84. 9. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глущенко Е.В., Ткачук Г.В. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глущенко Е.В. и [др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПП”. – 2004. – № 2, т. 2. – С.85-96.

Ткачук М.А., Шеремет В.М., Ткачук Г.В., Грабовський А.В.

РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ СПРИЯТЛИВИХ ПОВЕРХНЕВИХ
ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНИХ ПОЛІВ НАПРУЖЕНЬ
У ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТАХ МАШИН

У роботі описані нові теоретичні розробки, створені математичні моделі, унікальні програмно-модельні та програмно-апаратні комплекси, а також отримані результати числових досліджень полів напружень при дискретно-континуальному зміцненні деталей машин. Визначено оптимальні параметри технологічного процесу зміцнення.

Tkachuk M.A., Sheremet V.M., Tkachuk G.V., A.V. Grabovskiy

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC PRINCIPLES OF CREATION OF FAVOURABLE
SURFACE DISCRETE-CONTINUAL FIELDS OF TENSIONS
IN THE HIGH-LOADED ELEMENTS OF MACHINES

In this work the new theoretical developments, mathematical models and unique programmatic-modeling and hardware-software complexes are described, and also the results of numerical researches of tensions fields at the discrete-continual strengthening of machines details are obtained. The optimal parameters of technological process of strengthening are determined.
