

**ЕВРИСТИЧНІ ПРИЙОМИ ПОШУКУ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ
З НАНОСТРУКТУРНИХ МАТЕРІАЛІВ****В. В. Драгобецький, В. Т. Щетинін, І. О. Кузєв, Д. М. Молоштан, О. О. Наумова**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Сформовано можливі варіанти технологій відновлення та збереження нано- та субмікроструктурної структури матеріалів, заготовок і деталей в процесі експлуатації і на стадіях обробки експлуатації та регенерації. Для вирішення поставленої мети авторами запропоновано спільне використання евристичних методів, ієрархічність функціонального класифікатора і методів функціональних зв'язків. Поповнено фонд фізико-технічних ефектів і законів пластичної деформації принципами властивими процесам інтенсивної пластичної деформації. Використання методик морфологічного аналізу, ієрархічного функціонального класифікатора і функціонального аналізу дозволило розглянути можливі варіанти пошукових технологій, встановити функціональні зв'язки та методи оцінки структури матеріалу на всіх стадіях обробки в пластичному стані без порушення цілісності тіла деталі. Встановлено нову технологію одержання нанопокриттів і відновлення поверхневого шару матеріалу деталі в процесі експлуатації. Описано оригінальний метод оцінки структури матеріалу після експлуатаційних навантажень і застосування технологій відновлення. Встановлено раціональна область застосування не використаної раніше в промисловості технології. Вперше виконано комплексне дослідження можливих технологій відновлення нано- та субмікроструктурної структури поверхневого шару металу в процесі експлуатації і на всіх стадіях технологічної обробки. Вперше запропоновано метод оцінки структури матеріалу шляхом вимірювання мікротвердості. Запропоновано методіку експериментальної оцінки змін структури матеріалу шляхом вимірювання мікротвердості. Розширено області раціонального застосування нового методу фрикційної обробки розробленого авторами, вказана область застосування невикористаного раніше в промисловості способу імпульсної (вибуховий) обробки деталі.

Ключові слова: наноструктура, відновлення, збереження, морфологічний аналіз, мікротвердість, вибухо-фрикційна обробка.

**ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПОИСКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
С НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ****В. В. Драгобецкий, В. Т. Щетинин, И. О. Кузев, Д. М. Молоштан, Е. А. Наумова**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, м. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Сформированы возможные варианты технологий восстановления и сохранения нано- и субмикроструктурной структуры материалов, заготовок и деталей в процессе эксплуатации и на стадиях обработки эксплуатации и регенерации. Для решения поставленной цели авторами предложено совместное использование эвристических методов, иерархичность функционального классификатора и методов функциональных связей. Пополнен фонд физико-технических эффектов и законов пластической деформации принципами присущими процессам интенсивной пластической деформации. Использование методик морфологического анализа, иерархического функционального классификатора и функционального анализа позволило рассмотреть возможные варианты поисковых технологий, установить функциональные связи и методы оценки структуры материала на всех стадиях обработки в пластическом состоянии без нарушения целостности тела детали. Установлена новая технология получения нанопокровов и восстановление поверхностного слоя материала детали в процессе эксплуатации. Описан оригинальный метод оценки структуры материала после эксплуатационных нагрузок и применения технологий восстановления. Установлено рациональная область применения не использованного ранее в промышленности технологии. Впервые выполнено комплексное исследование возможных технологий восстановления нано- и субмикроструктурной структуры поверхностного слоя металла в процессе эксплуатации и на всех стадиях технологической обработки. Впервые предложен метод оценки структуры материала путем измерения микротвердости. Предложена методика экспериментальной оценки изменений структуры материала путем измерения микротвердости. Расширены области рационального применения нового метода фрикционной обработки разработанного авторами, указана область применения неиспользованного ранее в промышленности способа импульсной (взрывной) обработки детали.

Ключевые слова: наноструктура, восстановление, сохранение, морфологический анализ, микротвердость, взрыво-фрикционная обработка.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. При аналізі можливих варіантів вирішення проблеми збереження сформованої структури на всіх стадіях обробки і життєвого циклу деталі при поповненні баз знань з нанотехнологій ефективно і використання онтологічного підходу. Крім того онтологічний підхід крім систематизації знань з нанотехнологій спільно з евристичними прийомми дозволяє виявити перспективні

напрямки вдосконалення схем лезвійної і пластичної обробки матеріалів. Питання раціональних умов обробки і особливості процесів різання і пластичного деформування субмікроструктурних матеріалів висвітлені досить повно [1]. Тобто вирішені питання визначення режимів і параметрів обробки. Однак створення структури і її відновлення можливо не тільки шляхом раціонального визначення режимів

обробки в рамках теоретичної оцінки еволюції субмікро- і наноструктури в металах при нагріванні. Це різко знижує продуктивність процесів на інтенсивних режимах різання або гарячого пластичного деформування. Великі можливості для вирішення проблеми обробки наноматеріалів зі збереженням їх структури відкривають комбіновані методи обробки [2–5], керовані ефекти пластичного деформування [5–10] і інтенсифікують чинники. Це в свою чергу вимагає побудови нових розрахункових схем, фізико-математичних моделей і оригінальних теоретичних досліджень.

Пошук нових технічних рішень, технологічних схем і фізико-математичних моделей будуємо на основі класифікації схем процесу інтенсивної пластичної деформації [5]. Крім того формування методів відновлення структури і властивостей матеріалу при експлуатації будується на базі цього класифікатора [5].

Крім цього класифікатора [5] необхідна побудова і загального класифікатора отримання і обробки наноматеріалів. Також необхідне включення в класифікатор не тільки технологічне, але і функціональне призначення нанотехнологій. За цією ознакою технології спрямовані на отримання деталей і заготовок; збереження структури матеріалу заготовки з використанням керованих технологічних ефектів, що забезпечують інші види обробки в умовах інтенсивної пластично деформації (ПД), відновлення структури і механічних властивостей матеріалу деталі в процесі експлуатації. Останнє стосується процесів поверхневого зміцнення деталей, шляхом створення напопокриттів і формування зміцненого нанощару. В процесі експлуатації в умовах зносу стирається і його необхідно або відновлювати, або припинити експлуатацію. Збереження властивостей наноматеріалів в процесі експлуатації пов'язано з виключенням, компенсації і зниженням факторів, що викликають зростання зерна наноматеріалу.

Значення нових технологічних і фізичних ефектів можливо домогтися використовуючи спеціалізовані методи спрямованого синтезу, упорядкованих і неупорядкованих методів пошуку [11–13], серед яких найбільш перспективний узагальнений евристичний метод [1]. Останній припускає наявність інформаційної бази у вигляді систематизованих і класифікованих фондів технологічних рішень, а також фондів фізико-технічних і хімічних ефектів, законів розвитку технічних систем і евристичних прийомів.

В даний час інтенсивно розробляються і досліджуються ієрархічні і синергетичні механізми пластичного деформування і руйнування. Незважаючи на величезні досягнення статистичних методів, деякі об'єкти конденсованого тіла, що характеризуються індивідуальною поведінкою, не можуть бути описані набором параметрів, що визначають закони взаємодії цих об'єктів. Альтернативу статистичного підходу становить загальна теорія систем [1, 13]. В основу цього підходу покладено математичне визначення системи як відносини, заданого на вхідному і вихідному об'єктах системи, в якості яких зазвичай виступають деякі задані безлічі. Теорія систем не

вимагає введення статистичних ансамблів для об'єднання багатоваріантності поведінки систем.

Однак ряд завдань пластичного деформування, спрямованих на створення певної структури матеріалу можна вирішити в рамках феноменологічної теорії із застосуванням методів оптимізації [1, 3]. В даному випадку виникає необхідність використання кількісно-оптимізаційних моделей, що дозволяють дати кількісні рекомендації щодо вибору параметрів в зв'язку з рішенням задачі оптимізації структури матеріалу для подальшої операції пластичного деформування і в кінцевому підсумку для отримання термоміцності структури матеріалу.

В деякій мірі теорія систем перегукується з оптимізаційними техніко-економічними завданнями, які зводяться до визначення екстремальних значень деяких параметрів відгуку і величин відповідних їм визначальних параметрів.

В даний час розроблений значний арсенал прийняття технічних і технологічних рішень: використання ієрархічного функціонального класифікатора (ІФК) [13], метод аналізу функціональних зв'язків, метод Парето, метод морфологічного аналізу, побудова сценарію, побудова дерева цілей, метод QUEST [13].

Мета дослідження – формування можливих варіантів відновлення та збереження наноструктури матеріалів деталей та заготовок в процесах експлуатації та всіх стадіях механічної та пластичної обробки.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Застосування евристичних методів в даній роботі пов'язано з обґрунтуванням вибору напрямків фундаментальних і прикладних досліджень в області моделювання і прогнозування еволюції субмікро- і наноструктур металів на всіх стадіях обробки заготовок і експлуатації деталей. Крім того в зв'язку з тим, що споживання наноматеріалів зростає, актуальною є задача вторинного використання утилізованих виробів з цих матеріалів та питання збереження структури матеріалу утилізованих виробів на всіх стадіях руйнування, регенерації та виготовлення нових деталей.

На класифікуванні за загальними ознаками засновано один з поширених методів наукового і технічного пошуку - морфологічний аналіз. Останній відноситься до методів логічної організації ідей і дозволяє не тільки швидко увійти в суть досліджуваної проблеми і розширити область пошуку [11], але і виявити нові й перспективні фізичні ефекти, технічні й наукові рішення та підходи. В металообробці на додаток до морфологічних таблиць, класифікаторів технічних способів, фондів фізико-технічних ефектів, евристичних прийомів використані інформаційні фонди освоєних технологій тримання та відновлення наноструктурних матеріалів. Фонд фізико-технічних ефектів доповнений законами, ефектами і принципами властивих процесам інтенсивної пластичної деформації:

- закони пластичної деформації (закон найменшого опору, нерівномірність деформації, додаткових й остаточних напружень, подібності й моделювання процесів в пластичній деформації;
- закони взаємодії ударних хвиль з металами (теплові ефекти при адіабатичному стисненні, механізм

пластичної деформації, генерування дислокацій в умовах імпульсного навантаження масоперенос в ударних хвилях, явище відколону і т.д.);

- закони тертя;
- кавітаційне зміцнення металів при вибуховому навантаженні через передавальне середовище;
- процеси повернення і рекристалізації;
- дифузійні процеси і закони дифузії;
- адгезія і когезія;
- ефекти зміцнення та руйнування;
- ефекти впливу швидкості деформування;
- ефекти відколу і швидкої кристалізації;
- теорія проникнення;
- основні тенденції легування зносостійких сталей.

Для систематизації процесів відновлення властивостей наноматеріалів виділимо 10 основних аспектів, що характеризують проблему. Для кожного з цих аспектів можна знайти кілька варіантів рішень y_j^i , число яких знаходиться в межах від 2 до 11.

Відновлювані деталі y_j^1 з точки зору зручності в експлуатації наступні:

y_1^1 – зйомні деталі; y_2^1 – незйомні деталі.

Види втрати наноструктури y_j^2 : y_1^2 – зношування жорстко закріпленим абразивом; y_2^2 – зношування не твердо закріпленим абразивними частинками; y_3^2 – гідроабразивне зношування; y_4^2 – ударно-абразивне зношування; y_5^2 – під час мікрорізання; y_6^2 – при термічному впливі; y_7^2 – сколом; y_8^2 – викрашуванням.

Умови відновлення y_j^3 : y_1^3 – у польових виробничих умовах; y_2^3 – на спеціально обладнаній ділянці; y_3^3 – спеціалізоване обладнання переносне; y_4^3 – спеціалізоване обладнання стаціонарне.

Конструктивні та конструктивно-технологічні способи забезпечення й підвищення зносостійкості належать до класу y_j^4 : y_1^4 – виключення зовнішнього тертя; y_2^4 – поліпшення умов тертя; y_3^4 – компенсація термічних навантажень; y_4^4 – оптимізація форми деталей; y_5^4 – компенсація зношування; y_6^4 – резервування зносостійкості; y_7^4 – індикація зношування.

Серед способів відновлення обмежимося поверхневими методами зміцнення, що використовують концентровані потоки енергії y_j^5 : y_1^5 – вибухове легування; y_2^5 – фрикційне зміцнення; y_3^5 – вибухотермічна обробка (високошвидкісна деформація + термічна обробка); y_4^5 – електродривне легування; y_5^5 – вибухова обробка з утворенням нанооб'ємних шарів; y_6^5 – ударно-фрикційне зміцнення; y_7^5 – псевдо рідинне спікання; y_8^5 – імпульсно-термічна обробка; y_9^5 – імпульсно-фрикційна обробка.

Повторюваність навантаження (підведення концентрованого потоку енергії) y_j^6 : y_1^6 – одноразове навантаження; y_2^6 – багаторазове навантаження.

Переривчастість процесу руху інструменту y_j^7 : y_1^7 – зворотно-поступовий; y_2^7 – переривчастий; y_3^7 – обертовий; y_4^7 – віброімпульсний; y_5^7 – іонний компонент плазмового струменя; y_6^7 – непереривчастий.

Охват осередком відновлення об'єму деталі y_j^8 : y_1^8 – увесь обсяг; y_2^8 – за перерізом послідовно; y_3^8 – по робочим поверхням деталі.

Схеми навантаження y_j^9 : y_1^9 – контактний вибух пласкою хвилею; y_2^9 – контактний вибух «косою» хвилею, що біжить; y_3^9 – кавітаційне навантаження у воді; y_4^9 – кавітаційне навантаження у воді ударними хвилями, що сходяться; y_5^9 – кавітаційне навантаження у воді, яка насичена легувальними частинками; y_6^9 – кавітаційне навантаження ударними хвилями, що сходяться; y_7^9 – навантаження в плоскій ударній хвилі під час метання пластини ударника; y_8^9 – навантаження «косою» ударною хвилею, що біжить, під час метання пластини ударника; y_9^9 – навантаження ударною хвилею, що біжить, під час метання пластини ударника з легувальним шаром; y_{10}^9 – вибухове легування; y_{11}^9 – електродривне легування; y_{12}^9 – фрикційне навантаження.

Температурний режим y_j^{10} : y_1^{10} – холодний; y_2^{10} – теплий; y_3^{10} – гарячий; y_4^{10} – контрольований; y_5^{10} – імпульсний; y_6^{10} – з проміжною або остаточною термообробкою.

З огляду на те, що одним з найбільш перспективних цінних для практики напрямів застосування нанотехнологій є отримання виробів і напівфабрикатів та виробів з металів і сплавів, макроструктура яких доведена до такого рівня, що її складові – зерна – мають один або більше розмірів порядку кілька сотень або навіть десятків нанометрів. Такі матеріали мають якісно новий рівень механічних властивостей, досягти якого традиційними методами термічної, хіміко-термічної та пластичної обробки неможливо. Окрім цього, ці матеріали зберігають вихідну пластичність і в'язкість з показниками міцності та зносостійкості, що збільшуються в кілька разів. Тому має сенс занесення до в морфологічної таблиці технології отримання заготовок і виробів з наноструктурними станами матеріалу.

Ці дані зведені в так звану морфологічну модель (табл. 1).

Таблиця 1 – Морфологічна модель технології зміцнення

Аспекти проблеми	S_i	Варіанти розв'язування y_j^i
Відновлювані деталі	S_1	$y_1^1 y_2^1$
Видм втрати наноструктури	S_2	$y_1^2 y_2^2 y_3^2 y_4^2 y_5^2 y_6^2 y_7^2 y_8^2$
Умови відновлення	S_3	$y_1^3 y_2^3 y_3^3 y_4^3$
Конструктивні та конструктивно-технологічні способи забезпечення й підвищення зносостійкості належать до класу	S_4	$y_1^4 y_2^4 y_3^4 y_4^4 y_5^4 y_6^4 y_7^4$
Поверхневі методами зміцнення, що використовують концентровані потоки енергії	S_5	$y_1^5 y_2^5 y_3^5 y_4^5 y_5^5 y_6^5 y_7^5 y_8^5 y_9^5$
Повторюваність навантаження	S_6	$y_1^6 y_2^6$
Переривчастість процесу руху інструменту	S_7	$y_1^7 y_2^7 y_3^7 y_4^7 y_5^7 y_6^7$
Охват осередком відновлення об'єму деталі	S_8	$y_1^8 y_2^8$
Схеми зміцнення	S_9	$y_1^9 y_2^9 y_3^9 y_4^9 y_5^9 y_6^9 y_7^9 y_8^9 y_9^9 y_{10}^9 y_{11}^9$
Температурний режим	S_{10}	$y_1^{10} y_2^{10} y_3^{10} y_4^{10} y_5^{10} y_6^{10}$

Аналіз цієї моделі показує, що є $2*8*4*7*9*2*5*3*11*6 = 7983360$ різних варіантів способів відновлення структури матеріалу деталей процесу експлуатації. Частина з них практично не здійсненна.

Посєднання $y_2^1 y_1^2 y_1^3 y_6^5 y_1^6 y_7^6 y_3^8 y_{11}^9 y_5^{10}$ найефективніший метод ударно-фрикційного відновлення наноструктурних матеріалів.

Отже, запропонована морфологічна модель дозволила виявити принципово новий спосіб відновлення, що містить ударно-фрикційну обробку з отриманням дрібнозернистої наноструктури поверхневого шару. Крім того, модель дає змогу врахувати всі фізичні явища, що супроводжують процеси обробки, відновлення та одержання наноструктурних матеріалів. Ця модель пов'язана з відновленням структури матеріалу при зношування. Тому й усі методи зміцнення матеріалу, які при зношуванні непрямым чином впливають на процеси збереження структури матеріалу. В умовах експлуатації при інтенсивних силових навантаженнях та термічних навантаженнях слід використовувати фізичні та хімічні ефекти виводу теплової енергії з технічної або технологічної системи. Це такі як: розкладання газогідратів; за допомогою гідритів, ендотермічні реак-

ції, при розчиненні, при сублимації та ін. Фізичні ефекти: фазові переходи, ефект Джоуля-Томсона; ефект Ронка, магнітокерамічний ефект, термоелектричний ефект. Цю морфологічну модель слід доповнити моделями підвищення зносостійкості зниження термічного впливу, та конструктивних рішень зниження контактного тертя та зношування.

Найбільш раціонально використовувати метод ударно-фрикційної обробки для відновлення та збереження структури матеріалу на всіх технологічних операціях лезвийної та пластичної обробки деталей і заготовок практично будь-якої форми в виробничих і польових умовах. Метод імпульсної (вибухової) обробки доцільно використовувати для зміцнення і відновлення експлуатаційних характеристик деталей, що працюють в умовах ударно-абразивного і абразивного зношування. Ці деталі використовують в гірничодобувній промисловості, сільському господарстві, рейковому й гусеничному транспорті.

Подальші роботи будуть спрямовані на теоретичне обґрунтування і прикладні дослідження процесу імпульсного (вибухового) зміцнення та плакування.

Актуальним у цьому дослідженні є не тільки вибір та обґрунтування технології відновлення та збереження наноструктури матеріалу заготовок й деталей на етапах виробництва та експлуатації. Крім того потрібно оцінити стан структури й бажано за збереженням суцільності тіла деталі або заготовки.

Відомо, що у обробці металів тиском використовуються структурно-наслідкові методи визнання пружно-деформованого стану у мікроструктурному методі, який дозволяє надати оцінку деформованого стану шляхом визначення відстані між парами діаметрально розташованих точок границь зерен до деформації ρ_0 та після ρ . Використовуючи співвідношення кінцевих деформацій по співвідношенню ρ_0/ρ визначаються значення головних деформацій ϵ_i . Тобто маємо залежність розмірів зерна від значення головних і інтенсивних деформацій.

Відомо, що між твердістю метала, що деформується й інтенсивністю напруг і деформацій існує однозначна залежність [3]. Тому цей, якщо вникнути в його сутність [3] дозволяє визначити лінії рівного значення інтенсивності деформацій ϵ_i . Це дозволяє визначити зони де втрачено або відновлено нано- або субмікроструктурну структуру матеріалу. Для деталей та зразків з нанопокриттями не має сенсу будова тарированого графіка «інтенсивність деформацій-мікротвердість».

В певній мірі достатньо порівняти значення мікротвердості вихідного матеріалу та покриття. У подальших дослідженнях передбачається більш детально визначити можливості запропонованого варіанту відомого методу для визначення структури матеріалу.

Тобто метод визначення напружено-деформованого стану за розподілом твердості дозволяє також визначити й структуру матеріалу. Так якщо відомі структурно-фазові складові матеріалів мають певну твердість, то не вирішеним є питання відносно нано- й субмікроскопічних структур. Для

чого повинно створення банку даних по матеріалах з цією структурою. Перспективним напрямком на наш погляд є й використання технічних рішень, що використані у методі ударно-фрикційного зміцнення пластичним деформуванням та калібруючих методах обробки. Для підвищення динамічності процесу ударно-фрикційного методу зміцнення було б доцільно розглянути можливість розробки імпульсно-фрикційного зміцнення з використанням високоенергетичних джерел енергії (стиснений газ, магнітно-імпульсна обробка, електродгидравлічний ефект, детонаційні суміші й конденсовані вибухові речовини). Доцільність розвитку цього напрямку пов'язана з вирішенням проблем відновлення експлуатаційних характеристик, матеріалу деталей машин, механізмів і агрегатів у процесі експлуатації.

ВИСНОВОК. В результаті морфологічного аналізу можливих варіантів технологій обробки розроблена морфологічна таблиця, що включає 7983360 варіантів технологій.

Застосування морфологічного аналізу дозволило систематизувати технологічні прийоми, спрямовані на відновлення та збереження наноструктури матеріалів деталей і заготовок в процесі експлуатації та на технологічних етапах обробки. Систематичне вивчення можливих комбінацій рішень задачі відновлення деталей призвело не тільки до вирішення завдання, а й до принципово нової технології – ударно-фрикційного зміцнення та одержання нанопокриттів і відновлення поверхневого шару матеріалу деталі в процесі експлуатації. Встановлено раціональна область застосування не використаної раніше в промисловості технології. Вперше виконано комплексне дослідження можливих технологій відновлення нано- та субмікроструктурної структури поверхневого шару металу в процесі експлуатації і на всіх стадіях технологічної обробки. Вперше запропоновано метод оцінки структури матеріалу шляхом вимірювання мікротвердості. Запропоновано методику експериментальної оцінки змін структури матеріалу шляхом вимірювання мікротвердості. Розширено області раціонального застосування нового методу фрикційної обробки розробленого авторами вказана область застосування невикористаного раніше в промисловості способу імпульсної (вибуховий) обробки деталі.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миклашевич І. А. Микромеханіка руйнування в обобщенных пространствах. Минск, «Логвинов», 2003. 195 с.
2. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена. А. Н. Шаповал, С. М. Гор-

батьок, А. А. Шаповал. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. 352 с.

3. Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. Энергия. Деформации. Разрушение: моногр. УНІ-ВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 204 с.

4. Kazeminezhad M.: Combination of the upper bound and pots models for simulation of microstructure in wire drawing and annealing processes, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18/1, pp. 26–31.

5. Периг А. В., Тарасов А. Ф., Алтухов А. В. Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования (ипд.) объемных заготовок на основе онтологического подхода. *Вісник національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. № 46 (952). С. 83–89.

6. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*. 2000. Vol. 45. pp. 103–189.

7. Valiev R. Z., Langdon T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in materials science*. 2006. Vol. 51, No. 7. pp. 881–981.

8. Ferrasse S., Segal V. M., Alford F. et al. Scale up and application of equal-channel angular extrusion for the electronics and aerospace industries. *Materials Science and Engineering: A*. 2008. Vol. 493. N. 1-2. pp. 130–140.

9. Equal Channel Angular Extrusion of Soft Solids / A. V. Perig, A. M. Laptev, N. N. Golodenko, Yu. A. Erfort, E. A. Bondarenko. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527. N. 16-17, 25 June 2010. P. 3769–3776. – ISSN 0921-5093.

10. Shapoval A. A., Mos'pan D. V., Dragobetskii V. V. Ensuring High Performance Characteristics For Explosion-Welded Bimetals. *Metallurgist*, July 2016, Vol. 60, Iss 3, pp 313–317. DOI: 10.1007/S11015-016-0292.

11. Dragobetskii V. V., Shapoval A. A., Zagyanskii V. G. Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions. *Steel Transl.*, 2015, Vol. 45, Iss. 1, © Allerton Press, Inc., pp. 33–37. DOI: 10.3103/S0967091215010064.

12. Dragobetskii V. V., Shapoval A. A., Mospan D. V. et al. Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 4, pp. 363–368.

13. Загирняк М. В., Шаповал А. А., Наумова Е. А. Применение морфологического анализа при разработке оптимальной технологией получения лент из тугоплавких материалов. *«Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського»*. 2013. Вип. 6(83). С. 64–69.

A HEURISTIC SEARCH PROCEDURE FOR TECHNICAL SOLUTIONS TO RESTORE THE PARTS OF NANOSTRUCTURE MATERIALS

V. Dragobetskii, V. Shchetinin, I. Kuziev, D. Moloshtan, O. Naumova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Purpose. The goal of this work is to develop the possible options for the recovery and maintenance of the nano- and sub-microcrystalline structure of materials, work pieces and parts during operation and at the stages of processing the operation and regeneration. **Methodology.** To reach this goal, the authors have proposed the joint use of the heuristic

methods, hierarchical functional classifier and functional relationship methods. We have replenished the fund of the physical and technical effects and laws of the plastic deformation with the principles inherent for the processes of the intense plastic deformation. The use and determination of the functional relationships made it possible to find a method for assessing the structure of the material at all stages of treatment in a plastic state without violating the continuity of the body of the part. **Results.** Developing the possible options for search technologies has been performed by the determination of the functional relationships, methods of the morphological analysis, hierarchical functional classifier and functional analysis. We have established a new technology for producing nanocoatings and restoration of the surface layer of the material of a part during operation. An original method for assessing the structure of the material after the operational loads and the application of the recovery technologies is described. A rational field of application of the technology not previously used in industry is established. **Originality.** For the first time, a comprehensive study of possible technologies for restoring the nano- and submicrocrystalline structure of the surface layer of a metal during operation and at all stages of the technological treatment has been performed. For the first time, a method for assessing the structure of a material by measuring the microhardness has been proposed. **Practical value.** A technique has been proposed for the experimental assessment of the changes in the structure of a material by measuring the microhardness. The areas of the rational application of the new method of the friction treatment developed by the authors have been expanded; the field of the application of the method of pulse (explosive) treatment not previously used in industry of a part has been presented.

Key words: nanostructure, restoration, maintenance, morphological analysis, microhardness, explosive-friction treatment.

REFERENCES

1. Miklashevich, I. A. (2003), "Mikromekhanika razrusheniya v obobshchennykh prostranstvakh" [Micro-mechanics of fracture in generalized spaces], Minsk, «Logvinov», 195 p.
2. Shapoval, A. N. (2006), "Intensivnye processy obrabotki davleniem vol'frama i molibdena" [Intensive tungsten and molybdenum pressure treatment processes], «Ruda i Metally», 352 p.
3. Ogorodnikov, V. A. (2005), Energy. Deformatsii. Razrusheniye [Deformations. Destruction: monograph], UNIVERSUM, 204 p.
4. Kazeminezhad, M. (2009), Combination of the upper bound and potts models for simulation of microstructure in wire drawing and annealing processes, *Journal of Materials Engineering and Performance*, № 18/1.
5. Perig, A. V., Tarasov, A. F., Altukhov, A. V. (2012), "Sistematizatsiya protsessov intensivnogo plasticheskogo deformirovaniya (ipd.) ob'yemnykh zagotovok na osnove ontologicheskogo podkhoda" [Systematization of processes of intense plastic deformation (ipd.) Of bulk blanks based on the ontological approach.], *Visnik natsional'nogo tekhnichnogo universitetu* [Newsletter of the National Technical University], № 46 (952).
6. Valiev, R. Z. (2000), Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, vol. 45, pp. 103-189.
7. Valiev, R. Z. (2006), Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in materials science*, vol. 51, No. 7, pp. 881-981.
8. Ferrasse, S. (2008), Scale up and application of equal-channel angular extrusion for the electronics and aerospace industries, *Materials Science and Engineering*, vol. 493, N. 1-2, pp. 130-140.
9. Perig, A. V. (2010), Equal Channel Angular Extrusion of Soft Solids, *Materials Science and Engineering*, vol. 527, № 16-17, pp. 3769-3776. ISSN 0921-5093.
10. Shapoval, A. A., Mos'pan, D. V., Dragobetskii V. V. (2016), Ensuring High Performance Characteristics For Explosion-Welded Bimetals, *Metallurgist*, vol. 60, Iss. 3, pp. 313-317. DOI: 10.1007/S11015-016-0292.
11. Dragobetskii, V. V., Shapoval, A. A., Zagoryanskii, V. G. (2015), Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions, *Steel Translation*, © Allerton Press, Inc., vol. 45, Iss. 1, pp. 33-37. DOI: 10.3103/S0967091215010064.
12. Dragobetskii, V. V., Shapoval, A. A., Mospan, D.V. (2015), Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation, *Metallurgical and Mining Industry*, № 4, pp. 363-368.
13. Zagirnyak, M. V., Shapoval, A. A., Naumova, O. O. (2013), "Primenenie morfologi-cheskogo analiza pri razrabotke optimal'noj tekhnologij polucheniya lent iz tugoplavkih materialov" [The use of morphological analysis in the development of optimal technologies for production ribbons from refractory materials], *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University], vol. 6(83), pp. 64-69.

Стаття надійшла 01.04.2020.