

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ АЗОТОВАНИХ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ГЕОМЕТРІЇ БАГАТОВИМІРНОГО ПРОСТОРУ

*Розглянуто метод побудови графічних оптимізаційних моделей багатofакторних процесів на базі креслення Радищева, що дозволяє визначати оптимальні умови проведення технологічних процесів та прогнозувати властивості досліджуваних об'єктів. Побудовано модель оптимізації вибору технологічних параметрів режиму азотування у тліючому розряді з метою отримання комплексу характеристик, що визначають зносостійкість азотованої сталі.*

*Ключові слова: моделювання, графічна модель, багатofакторний процес, креслення Радищева, гіперповерхня, гіперплощина, тліючий розряд, модифікований шар, зносостійкість.*

G.M. SOKOLOVA

Khmelnytsky National University

## PREDICTION OF THE WEAR RESISTANCE OF NITRIDED STEEL BY THE METHODS OF MULTIDIMENSIONAL SPACE GEOMETRY

*The method of study of multifactorial processes by means of multidimensional space descriptive geometry is considered. This method makes it possible to represent functional dependence of processes resulting characteristics of any number of factors that determine their course.*

*The method of creation of graphic optimization models of multifactor processes is based on Radishchev drawings. Its peculiarity lies in the fact that the position of the point is determined by its three projections, which are located on the same lines. These models allow to determine the optimum conditions of processes and to predict the properties of the objects of study.*

*The model of determining of the optimum parameters area for the nitriding in glow discharge was created. It makes it possible to determine the mode parameters that provide the required wear resistance.*

*Key words: modeling, graphical model, multifactorial process, Radishchev drawing, hypersurface, hyperplane, glow discharge, modified layer, wear resistance.*

### Вступ

Для отримання заданих триботехнічних характеристик поверхонь тертя використовуються різноманітні технологічні методи модифікації матеріалів. До числа найбільш освоєних та широко використовуваних методів відноситься азотування у тліючому розряді (АТР). Чи не найбільшою його перевагою вважається керованість процесу, тобто можливість отримання необхідних результуючих характеристик залежно від параметрів режиму АТР. Між тим, при строгому підході, ця керованість є доволі відносною, оскільки за весь час використання вказаної технології прогнозування її результатів не вийшло за межі передбачення якісних змін. Як правило, у присвячених цьому питанню роботах вплив параметрів азотування на його результат оцінюється з позицій зростання або зменшення певної характеристики (найчастіше – мікротвердості поверхні). Що ж стосується визначення кількісних показників модифікованого шару, то як свідчить наведений в [1] аналіз джерел з аналітичного моделювання процесу АТР, ця задача є далекою від вирішення, тому на сьогодні питання розробки і застосування нових методів прогнозування властивостей азотованих сталей з метою покращення керованості процесу АТР зберігає свою актуальність.

### Аналіз джерел за темою дослідження

Задача прогнозування зносостійкості будь-яких матеріалів неабияк ускладнюється відсутністю єдиних, загальноприйнятих поглядів на питання визначення її критеріїв, що насамперед пов'язано із неможливістю урахування усіх факторів, відповідальних за умови, якісну картину та механізм зношування.

Наведений у роботі [2] критичний аналіз запропонованих у різний час критеріїв зносостійкості матеріалів змусив її авторів дійти висновку, що аналітичний шлях опису зношування і оцінки зносостійкості є дуже складним, малодостовірним, а можливо, й неприпустимим, адже базується він, як правило, на одному або декількох явищах. Вони можуть бути основними, однак не визначають у повній мірі опору спряжених поверхонь зношуванню, чим і пояснюється відмінність розрахункових даних щодо інтенсивності зношування матеріалів від отриманих експериментально. Більш перспективним автори вказаної роботи вважають підхід, що дозволяє ранжувати зносостійкість матеріалів на базі їхніх стандартних фізико-механічних характеристик. Результати аналізу експериментального матеріалу дозволили їм зробити висновок, що для інженерної практики найбільш доцільним, а головне, доступним, є вибір зносостійких сталей шляхом порівняння комплексу їхніх механічних властивостей – перевищення усіх характеристик міцності та пластичності однієї сталі над відповідними характеристиками іншої є достатньою підставою вважати цю сталь більш зносостійкою [2, с. 395].

Оцінювання з таких позицій зносостійкості азотованих в тліючому розряді сталей може зокрема передбачати порівняння мікротвердості модифікованого шару та його структури. Відомо, що у загальному випадку азотований шар складається з зони нітридних сполук ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  –  $\epsilon$ -фаза,  $\text{Fe}_4\text{N}$  –  $\gamma'$ -фаза) і розташованої під нею дифузійної зони або, як її ще називають, зони внутрішнього азотування (азотистого  $\alpha$ -твердого

розчину  $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ ), причому, чим тоншою є нітридна зона, тим більш пластичним є азотований шар. Найвища пластичність відповідає шару без нітридної зони [3].

Модифіковані шари необхідної мікротвердості, структури та фазового складу отримують шляхом варіювання технологічними параметрами режиму процесу АТР. Таким чином, забезпечення комплексу необхідних характеристик, що визначають собою зносостійкість сталі, можна розглядати як задачу оптимізації вибору режимів азотування за двома показниками – мікротвердістю поверхні та товщиною нітридної зони. Використання методів математичного моделювання дозволяє вирішити цю задачу з високим ступенем точності. Аналітичні моделі, як зазначалося в роботі [1], можуть виявитися доволі громіздкими, особливо при наявності значної кількості вихідних факторів впливу, тому на особливу увагу заслуговує наведений у [4] метод побудови графічних моделей оптимізаційної області багатofакторних процесів, в якому вихідні фактори процесу та отримані результати розглядаються як елементи багатовимірного простору. Ці моделі вирізняються не лише наочністю представлення результатів, – що становить найбільшу їхню перевагу, – але й відносною простотою реалізації. Крім того, процес побудови моделі надає широкі можливості для його автоматизації, що має неабияке значення з точки зору перспектив її застосування.

В основу методу покладена модель чотиривимірного простору Радищева, особливість якої полягає у тому, що положення точки у цьому просторі визначається трьома її проекціями, які розташовані на одній лінії зв'язку (рис. 1). Розмірність креслення може бути збільшена, що, зрозуміло, спричинить збільшення кількості проекційних площин, але проекції точки при цьому і надалі лежатимуть на одній лінії зв'язку. Наведене у роботі [5] обґрунтування адекватності креслення Радищева як моделі багатовимірного простору дозволяє використовувати його для розв'язання задач оптимізації багатofакторних процесів.

Загальний алгоритм побудови геометричних моделей оптимізації процесу за двома результуючими показниками наведений у роботі [6] і може бути представлений наступною схемою (рис. 2).

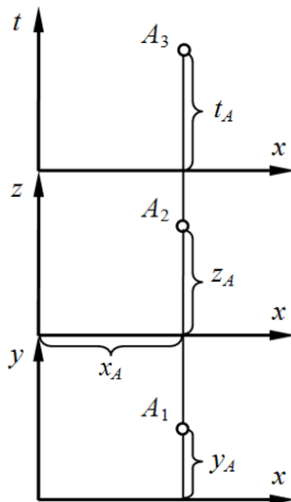


Рис. 1. Модель чотиривимірного простору Радищева [4]

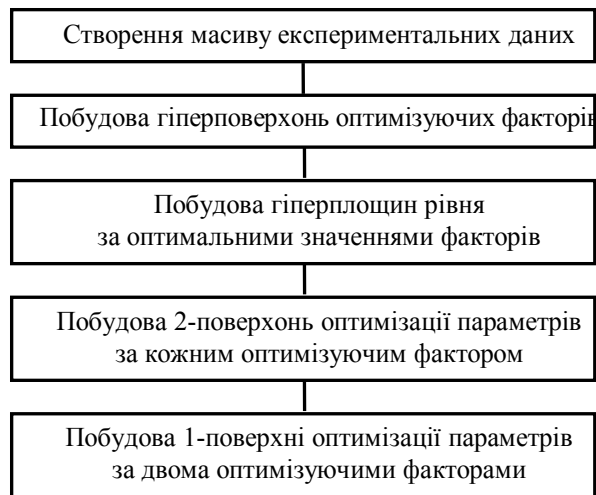


Рис. 2. Алгоритм побудови графічних оптимізаційних моделей багатofакторних процесів

Наведений алгоритм побудови графічних моделей може використовуватись при різній кількості оптимізуючих факторів та параметрів оптимізації (терміни прийняті згідно з [4 – 6]).

### Постановка завдання

На базі загального алгоритму побудови графічних оптимізаційних моделей багатofакторних процесів створити модель оптимізації вибору режимних параметрів АТР, здатних забезпечити необхідну зносостійкість сталі, критерієм якої виступає комплекс результуючих характеристик модифікованого шару, а саме – задані мікротвердість поверхні та товщина нітридної зони.

### Виклад основного матеріалу

Сутність пропонованого методу моделювання розглянемо на прикладі побудови графічної моделі визначення області оптимальних параметрів режиму АТР, здатних забезпечити необхідний рівень зносостійкості азотованої в тліючому розряді сталі 40X. Модель будується на основі експериментально отриманих даних, що характеризують залежності оптимізуючих факторів (для процесу АТР – мікротвердості поверхні та товщини нітридної зони) від параметрів оптимізації (режимів азотування).

Експериментальні дослідження проводились на установці УАТР-1, призначеній для азотування в тліючому розряді у безводневих газових середовищах. Всього проведено 27 технологічних процесів. Після азотування контрольні зразки циліндричної форми (діаметр 5 мм, довжина 20 мм) розрізались в діаметральній площині при параметрах різання, які не призводили до суттєвого їх нагрівання, що забезпечувало незмінність структури модифікованого поверхневого шару. Мікротвердість вимірювалась на мікротвердомірі ПМТ-3. Травлення сталей для виявлення структури азотованого шару виконувалось за

допомогою 3-відсоткового спиртового розчину азотної кислоти  $\text{HNO}_3$ . Вимірювання товщини нітридної зони проводилося за допомогою металографічного мікроскопа МІМ-10; її середнє значення розраховувалося як середнє арифметичне значення вимірювань, проведених у 25 точках досліджуваного зразка.

Параметри режимів процесу АТР та необхідні для побудови моделі показники модифікованого шару для сталі 40Х наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

## Технологічні режими азотування та його результати для сталі 40Х

Номер режиму	Температура $a$ , °С	Тиск, торр	Склад газового середовища	Мікротвердість поверхні за Віккерсом $HV$	Середня товщина нітридної зони $h$ , мкм
1	520	0,6	N80Ar20	822	3,38
2			N50Ar50	885	5,25
3			N20Ar80	790	2,86
4		0,9	N80Ar20	925	5,36
5			N50Ar50	941	7,83
6			N20Ar80	857	3,18
7		1,2	N80Ar20	974	5,04
8			N50Ar50	931	6,46
9			N20Ar80	803	2,24
10	560	0,6	N80Ar20	886	7,80
11			N50Ar50	915	11,49
12			N20Ar80	753	3,63
13		0,9	N80Ar20	918	5,55
14			N50Ar50	902	9,01
15			N20Ar80	808	2,18
16		1,2	N80Ar20	924	11,25
17			N50Ar50	916	8,47
18			N20Ar80	851	5,23
19	600	0,6	N80Ar20	918	15,89
20			N50Ar50	836	16,69
21			N20Ar80	856	9,22
22		0,9	N80Ar20	871	3,48
23			N50Ar50	901	10,83
24			N20Ar80	777	8,15
25		1,2	N80Ar20	880	14,05
26			N50Ar50	885	17,78
27			N20Ar80	809	6,07

Гіперповерхні оптимізує чинників задаються сімействами 1-поверхонь, які в даному випадку представлені кривими залежностей мікротвердості поверхні та товщини нітридної зони від режимних параметрів процесу – температури  $T$ , тиску  $p$  та вмісту азоту у газовій суміші  $N$  (рис. 3).

Побудова цих кривих передбачає представлення кожного експерименту (умов його проведення і результату) у якості 0-площини з певним набором координат. Так, для експерименту, проведеного за першим технологічним режимом, координати 0-площини становитимуть: 822 HV;  $T = 520$  °С;  $p = 0,6$  торр;  $N = 80$  %. Шляхом варіювання одного з параметрів режиму (у прикладі, що розглядається, це температура, яка приймає значення  $T = 560$  °С та  $T = 600$  °С) визначають ще дві 0-площини, після чого через три 0-площини проводять апроксимуючу 1-поверхню, яка на кресленні представлена кривою  $Hr06N80$ . Присвоюючи параметру  $N$  значення  $N = 50$  % і варіюючи параметром  $T$ , отримують ще три 0-площини, через які проводять наступну апроксимуючу 1-поверхню ( $Hr06N50$ ). Аналогічно отримують 1-поверхню, представлену кривою  $Hr06N20$ . Далі параметру  $p$  присвоюють значення  $p = 0,9$  торр і після варіювання параметрів  $T$  та  $N$  отримують криві  $Hr09N80$ ,  $Hr09N50$ ,  $Hr09N20$ . І нарешті після присвоєння  $p = 1,2$  торр аналогічним чином будують 1-поверхні, представлені кривими  $Hr12N80$ ,  $Hr12N50$ ,  $Hr12N20$ .

Сукупність дев'яти перерахованих 1-поверхонь утворює каркас гіперповерхні мікротвердості поверхні модифікованого шару сталі, азотованої в тліючому розряді. Каркас гіперповерхні товщини нітридної зони (1-поверхні  $hp06N80$ ,  $hp06N50$ ,  $hp06N20$ ;  $hp09N80$ ,  $hp09N50$ ,  $hp09N20$ ;  $hp12N80$ ,  $hp12N50$ ,  $hp12N20$ ) будується аналогічно.

Залежно від умов майбутньої експлуатації деталі задається необхідна комбінація результуючих характеристик модифікованого шару. Припустімо, що азотована деталь працюватиме в корозійному середовищі при малих контактних навантаженнях. Згідно з наведеними у роботі [3] рекомендаціями це вимагає високої твердості поверхні і розвинутої нітридної зони, тому, як варіант, присвоїмо оптимізує чинникам наступні значення: 900 HV,  $h = 12$  мкм. Геометрично ці значення є гіперплощинами рівня.

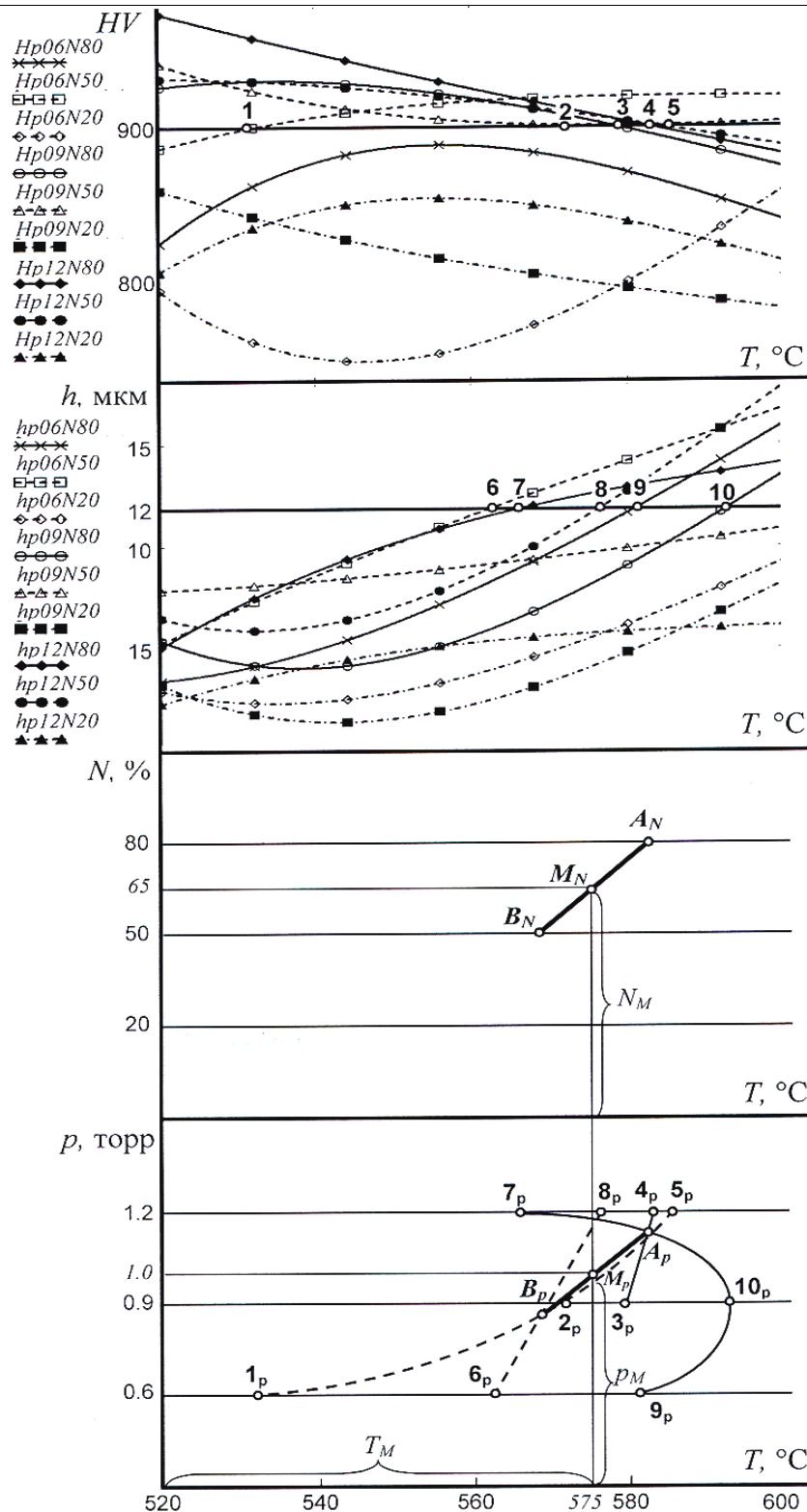


Рис. 3. Графічна модель оптимізації процесу азотування у тліючому розряді (визначення області параметрів режиму за комплексом результатуючих характеристик)

Для розширення гіперповерхонь один з параметрів (у наведеному прикладі – вміст азоту у газовій суміші  $N = 80\%$ ) приймається постійною величиною, при цьому параметри  $T$  та  $p$  варіюються. Нехай при  $N = 80\%$  параметр  $p$  змінюється дискретно, приймаючи значення  $p_1 = 0,6$  торр,  $p_2 = 0,9$  торр та  $p_3 = 1,2$  торр, а параметр  $T$  приймає значення  $T_1 = 520$  °C,  $T_2 = 560$  °C та  $T_3 = 600$  °C, тоді отримаємо 2-поверхню оптимізації  $H_{r06N80}$ ,  $H_{r09N80}$ ,  $H_{r12N80}$  фактора  $H$  та 2-поверхню оптимізації  $h_{p06N80}$ ,  $h_{p09N80}$ ,  $h_{p12N80}$  фактора  $h$  для кожного значення  $p$ . У результаті перетину кожної з вказаних 2-поверхонь з відповідною гіперплощиною рівня отримаємо дві 1-поверхні: 3-4 та 9-10-7. Визначимо 0-площину їх перетину  $A(A_p, A_N)$ .

Аналогічно, варіюючи значення  $p$  та  $T$  при  $N = 50\%$ , отримаємо 2-поверхню оптимізації  $H_{r06N50}$ ,  $H_{r09N50}$ ,  $H_{r12N50}$  фактора  $H$  і 2-поверхню оптимізації  $h_{p06N50}$ ,  $h_{p09N50}$ ,  $h_{p12N50}$  фактора  $h$  та визначимо

1-поверхні їх перетину з відповідними гіперплощинами рівня: 1-2-5 та 6-8, після чого знайдемо 0-площину їх перетину  $B(B_p, B_N)$ .

Очевидно, що 2-поверхні оптимізації  $Hp06N20$ ,  $Hp09N20$ ,  $Hp12N20$  та  $hp06N20$ ,  $hp09N20$ ,  $hp12N20$  з гіперплощинами рівня не перетинаються (див. рис. 3). Це означає, що отримати задану комбінацію мікротвердості поверхні та товщини нітридної зони при  $N = 20$  % неможливо.

У загальному випадку дискретна кількість 0-площин утворює 1-поверхню, яка визначає область оптимізації вихідних параметрів. У даному прикладі 0-площини  $A(A_p, A_N)$  та  $B(B_p, B_N)$  утворюють 1-поверхню  $AB(A_p B_p, A_N B_N)$ , яка визначає область оптимізації вибору технологічних параметрів режиму АТР. Вона обмежена наступними значеннями: температура – від 570 до 583 °С, тиск – від 0,85 до 1,15 торр, вміст азоту у газовому середовищі – від 50 до 80 %. Координати будь-якої 0-площини (наприклад, 0-площини  $M(M_p, M_N)$  з координатами  $T_M = 575$  °С,  $p_M = 1$  торр,  $N_M = 65$  %), що належить 1-поверхні  $AB(A_p B_p, A_N B_N)$ , є тією комбінацією параметрів режиму, при якій мікротвердість поверхні становить 900 HV, а товщина нітридної зони  $h = 12$  мкм.

Очевидною перевагою наведеного методу моделювання є наочність. Графічне представлення залежностей результатів азотування від параметрів режиму дозволяє іще до проведення побудов зробити попередні висновки щодо можливості забезпечення необхідних властивостей модифікованого шару. Наприклад, якщо бажана комбінація результуючих характеристик передбачає поєднання високої мікротвердості поверхні з максимально можливим значенням товщини нітридної зони, то з двох підходящих для цього варіантів параметрів режиму ( $T_1 = 600$  °С,  $p_1 = 0,6$  торр,  $N_1 = 50$  % та  $T_2 = 600$  °С,  $p_2 = 1,2$  торр,  $N_2 = 50$  %) доцільніше обрати перший, оскільки, як видно з рис. 3, при майже рівних значеннях товщини нітридної зони мікротвердість поверхні за таких умов азотування значно вища.

Таким чином, дослідження багатофакторних процесів за допомогою методів нарисної геометрії багатовимірного простору дає можливість графічно представляти функціональні залежності результуючих характеристик процесу від довільної кількості факторів впливу. Наведений метод побудови оптимізаційних моделей на базі креслення Радищева дозволяє визначати оптимальні умови проведення будь-яких технологічних процесів та прогнозувати властивості досліджуваних об'єктів.

#### Висновки

Розглянуто графічний метод побудови оптимізаційних моделей багатофакторних процесів засобами нарисної геометрії багатовимірного простору. Побудовано модель визначення області оптимальних параметрів режиму АТР, здатних забезпечити необхідний рівень зносостійкості азотованої сталі.

#### Література

1. Соколова Г. М. Аналітичне моделювання процесу модифікації металевих поверхонь в тліючому розряді з автономними параметрами режиму / Г. М. Соколова, І. М. Пастух // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 11–16.
2. Виноградов В. Н. Износостойкость сталей и сплавов : учеб. пособие для вузов / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин. – М. : Нефть и газ, 1994. – 417 с.
3. Лахтин Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
4. Чижик М. А. Применение методов инженерной геометрии для решения задач оптимизации многофакторных процессов / М. А. Чижик, В. Я. Волков, Е. Я. Сурженко // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18. – № 14. – С. 840 – 848.
5. Устинова О. В. Разработка оптимизационной модели процесса соединения текстильных материалов на основе чертежа Радищева многомерного пространства : автореф. дис. на соискание научной степени канд. техн. наук : 05.01.01 / О. В. Устинова ; Омский гос. ин-т сервиса. – Омск, 2006. – 23 с.
6. Чижик М. А. Алгоритмы конструирования графических оптимизационных моделей многофакторных процессов / М. А. Чижик, К. С. Яковенко, В. Я. Волков // Омский научный вестник. – 2012. – № 1. – С. 17–20.

#### References

1. Sokolova G. M. Anallitichne modelyuvannya protsesu modifikatsiyi metalivih poverhon v tilyuchomu rozryadi z avtonomnimi parametrami rezhimu / G. M. Sokolova, I. M. Pastuh // Visnik HNU. Tehnichni nauki. – 2015. – # 2. – S. 11–16.
2. Vinogradov V. N. Iznosostoykost staley i splavov : ucheb. posobie dlya vuzov / V. N. Vinogradov, G. M. Sorokin. – M. : Neft i gaz, 1994. – 417 s.
3. Lahtin Yu. M. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov / Yu. M. Lahtin, B. N. Arzamasov. – M. : Metallurgiya, 1985. – 256 s.
4. Chizhik M. A. Primenenie metodov inzhenernoy geometrii dlya resheniya zadach optimizatsii mnogofaktornyih protsessov / M. A. Chizhik, V. Ya. Volkov, E. Ya. Surzhenko // Vestnik TG TU. – 2012. – T. 18. – # 14. – S. 840 – 848.
5. Ustinova O. V. Razrabotka optimizatsionnoy modeli protsesa soedineniya tekstilnyih materialov na osnove chertezha Radischeva mnogomernogo prostanstva : avtoref. dis. na soiskanie nauchnoy stepeni kand. tehn. nauk : 05.01.01 / O. V. Ustinova ; Omskiy gosudarstvenniy institut servisa. – Omsk, 2006. – 23 s.
6. Chizhik M. A. Algoritmy konstruirovaniya graficheskikh optimizatsionnykh modeley mnogofaktornyih protsessov / M. A. Chizhik, K. S. Yakovenko, V. Ya. Volkov // Omskiy nauchniy vestnik. – 2012. – # 1. – S. 17–20.