

УДК 621.78/(66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, М.В. ЛУК'ЯНЮК, В.О. КУРСКАЯ  
Хмельницький національний університет**ПЕРСПЕКТИВИ КЕРОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ  
ТРИБОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ АЗОТУВАННІ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З  
НЕСТАЦІОНАРНИМ ЖИВЛЕННЯМ**

*Проведено аналіз процесу керованого формування поверхневих шарів при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням.*

*The analysis of process of the guided forming of superficial layers is conducted at nitriding in glow discharge with the variable delivery.*

Ключові слова: формування трибосистем, азотування, тліючий розряд, нестационарне живлення.

Головним завданням модифікації поверхні металевих виробів (ріжучого інструменту, пар тертя, елементів формоутворення ливарного, пресового та штампувального устаткування) є створення локального поверхневого шару з властивостями, які за характеристиками принципово відрізняються від основи-матриці та забезпечують підвищення працездатності об'єктів обробки в умовах інтенсивного впливу факторів експлуатації з реальними параметрами.

Стосовно виробів машинобудування в поняття високотехнологічності в першу чергу вкладаються вимоги працездатності та економічності. Ці характеристики забезпечуються терміном безвідмовної роботи, збереженням високих та достатніх експлуатаційних характеристик, потрібних для виконання певних заявлених функцій протягом всього запланованого терміну служби, низьких витрат на відновлення нормального стану працездатності. В першу чергу, означені задачі забезпечуються шляхом модифікації металевих деталей машин, інструменту та оснащення технологічних машин, причому модифікаційні процеси завжди були пріоритетними та актуальними протягом всієї історії розвитку науки та техніки. Дійсно, з самого початку технічного процесу, враховуючи потенціально недостатні параметри початкового стану матеріалів, модифікаційні технології що не далі виходили на позиції головних складових виробництва, спочатку – у варіанті більш простих в реалізації обробок об'єму. Починаючи з другої половини ХХ століття на перший план виступають поверхневі модифікаційні процеси, оскільки в цьому випадку більш раціонально використовуються як трудові, так і енергетичні ресурси, та створюються кращі умови для екологічної безпеки [1–4].

Відомо більше сотні різновидів модифікаційних технологій [5], серед яких азотування в тліючому розряді цілком обґрунтовано та закономірно може бути віднесене до технологій універсального застосування. Це твердження має під собою ту основу, що означена технологія може використовуватись як для деталей, котрі складають в машинах пари тертя, так і для інструменту, призначеного для обробки різних матеріалів (метал, деревина, мінерали тощо), штамтів, прес- та літформ (формування виробів з пластмас, легких сплавів тощо), оснащення. Паралельно з підвищенням зносостійкості, поверхневої міцності, розгаростійкості, та інших позитивних наслідків, котрі сприяють зростанню ресурсу нормальної працездатності, процес забезпечує у певній мірі корозійну стійкість та інші менш значущі, але від цього теж не менш важливі наслідки модифікації.

Найбільш широко, а до недавнього часу пріоритетно, в якості газового середовища при азотуванні в тліючому розряді використовувались суміші на основі аміаку (так зване аміачне іонне азотування), що має причиною наслідування традицій пічного азотування, яке в хронології розвитку поверхневої обробки металів передувало досліджуваному процесу. Головним недоліком цього варіанту модифікаційної технології є негативне явище водневого окрихчення, хоча показники твердості при цьому можуть бути і вищими. Ця вада, наприклад, практично унеможливує використання згаданої технології для більш-менш якісного підвищення ресурсу роботи інструменту, особливо того, який працює в умовах ударних навантажень. Іншим негативним наслідком що не далі, то все менш допустимим, є екологічна небезпечність процесу. Перелік тільки цих недоліків обґрунтовує перспективність безводневого азотування в тліючому розряді, який абсолютно екологічно чистий та забезпечує кращі показники пластичності поверхні. Основи азотування в безводневому газовому середовищі, особливо в аспекті матеріалознавчих питань, викладені в [6].

Очевидно, що подальший прогрес стосовно виробничого застосування будь-якої, в тому числі згаданої технології, повинен базуватись на ґрунтовних теоретичних засадах, оскільки без наявності моделі, яка б за можливістю адекватно відповідала реальному явищу, що характерні для процесу модифікації, практично неможливо побудувати картину їх взаємовідношень, а відтак – точну картину впливу технологічних факторів на кінцеві результати обробки. Прийняті в теорії досліджуваного процесу моделі, котрі сформовані, в першу чергу, у роботах [7–15], в значній мірі акцентують увагу в основному на дифузійних явищах в модифікованому поверхневому шарі, проте не можуть адекватно пояснити деякі процеси, супутні азотуванню в тліючому розряді. Крім того, дві основні моделі [9, 12] взаємно та

безкомпромісно виключають одна одну, причому в деяких моментах – цілком обґрунтовано. З огляду на це актуальність розробки теоретичних основ, які базуються насамперед на вихідних положеннях фізики газорозрядних процесів у застосуванні їх до означених процесів, безсумнівна. Саме таким шляхом можливо не тільки розкрити тонкий механізм взаємодії часток в газовому середовищі та часток падаючого потоку з поверхнею, але й встановити нові потенціальні можливості технології. Очевидно, що остання частина поставленої задачі досліджень повинна проводитись на нанорівні, оскільки чисто термодинамічні підходи дають тільки загальну картину явища, часто не відкриваючи перспективних можливостей модифікації поверхні металів та їх сплавів. Раніше [16] встановлена пріоритетність саме енергетичних підходів до формування моделі вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій, за допомогою яких стали можливими як розробка системи аналітичних критеріїв ефективності модифікації, так і проектування процесів, котрі забезпечували б необхідні кінцеві результати.

Оскільки практично всі зазначені вище дослідження стосуються варіанту реалізації процесу поверхневої модифікації при живленні струмом з умовно постійними параметрами, то окремий аспект теорії і практики відноситься до широкої гами режимів, коли тліючий розряд характеризується нестационарною, змінною в часі напругою. Окремим варіантом може бути циклічно комутований розряд, хоча в цьому випадку головні переваги в основному лежать в області чисто технологічних обставин. Концептуальні підходи до досліджуваного питання характеризуються наступним. Як зазначалось в [17], процес модифікації поверхні металів дифузійним насиченням її в тліючому розряді включає систему субпроцесів. Проте детальний механізм їх сукупності, наведений в зазначеному джерелі, може бути спрощений до схеми, що включає субпроцеси утворення дифундидів (для азотування – нітридів), розпорошення поверхневого шару та дифузійне насичення поверхневого шару дифузантом (для азотування – азотом). В загальному випадку процес поверхневої модифікації характеризується сукупністю вихідних параметрів  $P_n$ , кількість яких від одиниці до  $n$ . Як наслідок модифікації формується система результатів  $R_m$ , число котрих від одиниці до  $m$ . Саме вони і складають фазову структуру  $\Phi C$  поверхневого модифікованого шару. Зміна субстанції певного результату залежить від реальної швидкості його утворення  $V_m$ . Складність аналізу подібної багатофакторної системи полягає, насамперед, в тому, що в будь-який момент часу певна швидкість в загальному вигляді залежить не тільки від всіх параметрів технологічного режиму, але і від усіх вже досягнутих на цей же час результатів. В цьому проблематичність задачі, але саме й це відкриває, як буде показано нижче, можливість гнучкого керування процесом модифікації, а головне – його результатами. Схема взаємостосунків означених вище факторів модифікації показана на рис. 1.

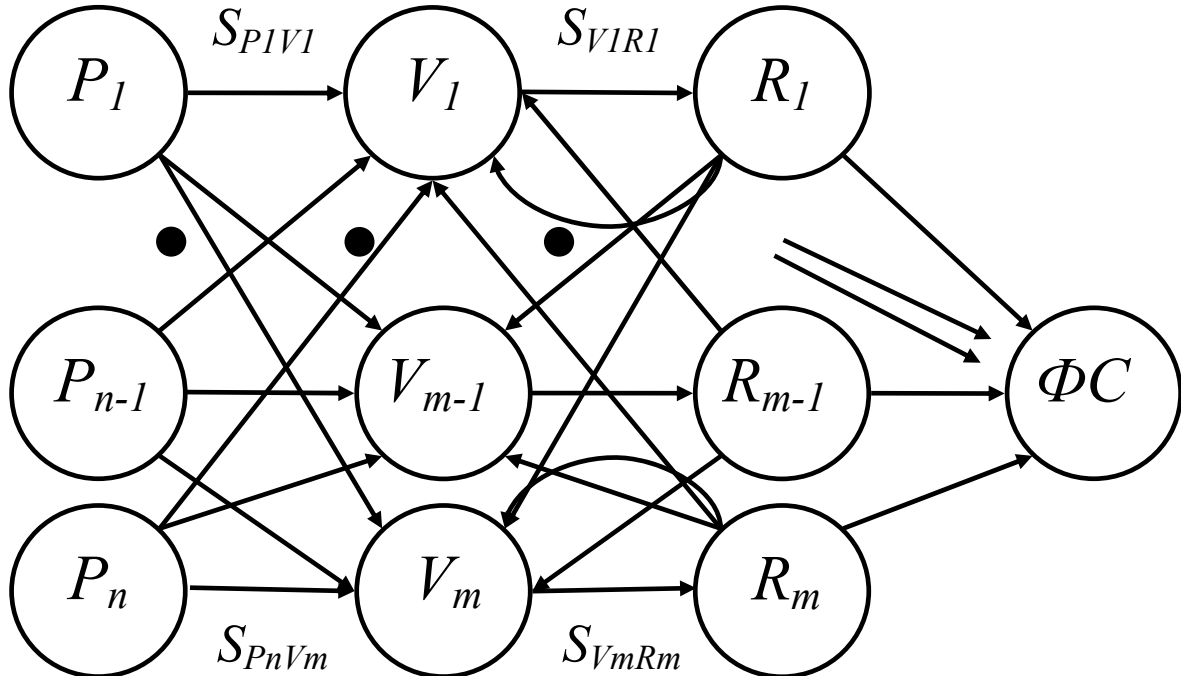


Рис. 1. Загальна схема взаємовпливу факторів процесу модифікації поверхні

З рис. 1, насамперед, очевидний висновок полягає в тому, що модифікація поверхні є мультिवаріантним процесом, тобто залежно від поточної комбінації факторів впливу формування фазової системи може йти за різними напрямками – маршрутами, причому в кожній конкретній ситуації інтенсивність утворення тієї чи іншої фази може бути не тільки різною за величиною, але і за знаком. Останнє слід розуміти так, що попередньо вже створена певна фаза знаходиться під впливом деструктивних явищ, наприклад, за рахунок розпорошення попередньо утворений прошарок нітридів почне зменшуватись, що додатково стимулюватиме дифузію тощо. Саме **мультिवаріантність** є тією головною засадою, яка може

скласти основу керованого процесу формування фазової системи. Між елементами взаємодії, представленими на рис. 1 встановлюються зв'язки  $S$ , індекси позначення котрих утворюються за принципом керуючий фактор – керований фактор, наприклад для зв'язку між результатом першого субпроцесу та його швидкістю зв'язок позначається  $S_{R1V1}$ . Ці зв'язки в загальному вигляді можна розділити на критичні, наслідком дії яких є досягнення суттєвої зміни керованого фактора; номінальні з результатом хоч незначної, але все ж таки зміни; формальні, які не призводять практично ні до якої більш-менш помітної зміни стану керованого фактора. Відповідно до цього роль факторів впливу можна кваліфікувати як головну чи другорядну, причому їх вплив може бути стимулюючий, пригнічуючий або нейтральний. Слід також зауважити, що ця роль не завжди є однозначною, оскільки при певних співвідношеннях між керуючим та керованим факторами керуючий стимулює ріст відповідних показників керованого, при інших – навпаки може зменшувати їх або взагалі на них не впливає. Характерним прикладом в цьому сенсі служить вплив температури на утворення нітридної зони, коли з ростом температури спочатку інтенсивність утворення нітридів збільшується, а потім починається їх розпад, що призводить до збільшення зони дифузійного насичення. Параметри  $P$  з деякою умовністю можна розділити на режимні та енергетичні. До перших, наприклад, відносяться склад газового середовища, температура поверхні, тиск тощо, до других – напруга та струм розряду. Результати  $R$  можуть бути фазоформуєчими, тобто такими, котрі безпосередньо становлять основу фазової системи; кінетичними, які створюють умови для прискорення або уповільнення формування інших фаз; блокуючими, котрі практично унеможливають хід певного паралельного субпроцесу; антагоністичними по відношенню до певного контрпроцесу.

В [17] наводилась залежність загального виду для визначення швидкості деякого субпроцесу, відповідно до позначень, використаних на рис. 1

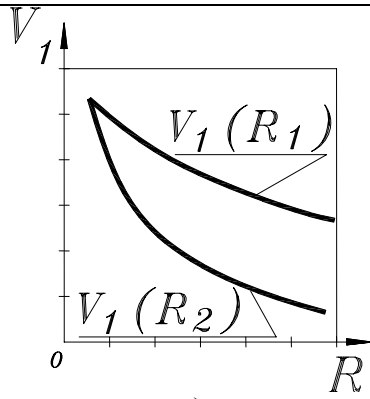
$$V_i = v(R_1, R_2 \dots R_m, P_1, P_2 \dots P_n)$$

Тоді результат цього субпроцесу за певний проміжок часу (причому помітну роль може відігравати не тільки абсолютне значення часового інтервалу, але і його місцезнаходження на часовій шкалі всього модифікаційного процесу)

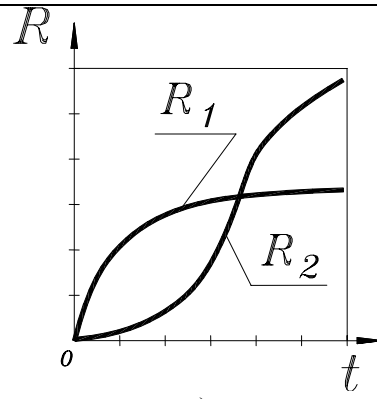
$$R_i = \int_{t_1}^{t_2} V_i(t) dt$$

Таким чином, суть керованого формування фазової структури полягає в раціональному з точки зору досягнення певних потрібних результатів використанні мультиваріантності реалізації модифікаційного процесу. Розглянемо детальніше цю тезу на прикладах. На рис. 2 представлена ситуація, коли швидкості двох субпроцесів по різному залежать від досягнутих ними результатів: швидкість першого з них хоч і з різною інтенсивністю, але знижується при зростанні результатів обох субпроцесів; швидкість другого субпроцесу при зростанні одного з них теж зростає, аналогічно іншого результату – навпаки зменшується. В кінцевому варіанті результати співвідносяться між собою у часі так, що спочатку превалює один з них, в певний час вони зрівнюються, а потім починається фаза інтенсивного росту іншого субпроцесу. З рис. 2 слідує висновок, що керуючи співвідношеннями швидкостей та результатів окремих субпроцесів в часі можливе регулювання формування структури поверхневого модифікованого шару. При цьому важливо вловити той критичний момент, коли відношення між швидкостями стає таким, що певний субпроцес превалює на інших або забезпечує потрібний характер формування поверхневого шару. Справа в тому, як це впливало з аналізу рис. 1, що будь який з відображених на рис. 2 субпроцесів може в тій чи іншій по впливовості мірі залежати від третього субпроцесу, не включеного в рис. 2. Тоді з'являється можливість в попередньому проміжку часу налагодити таке співвідношення складових модифікаційного процесу, котре сприяло б випереджаючому росту того з результатів субпроцесів на рис.2, який в подальшому призвів би до досягнення одним з них потрібної швидкості та кінцевої структури модифікованого шару поверхні. Якраз вся складність програмованої модифікації поверхні полягає у встановленні оптимальних послідовності та характеру взаємовідносин і взаємовпливу факторів моделі процесу з врахуванням реальності та значимості цих взаємостосунків для досягнення необхідних з огляду на подальшу експлуатацію результатів. Використовуючи подібний алгоритм слідування результатів можливо забезпечити на момент часу, відображений на рис. 2 як нульовий, таке значення результатів обох субпроцесів, яке в подальшому прискорило б формування потрібного за величиною та вимогами експлуатації результату та загальмувало або взагалі зупинило б небажаний.

На рис. 3 відображено процес формування певного результату, причому головним визначальним фактором у цьому випадку прийнято швидкість того ж субпроцесу, результат котрого досліджується. З рис. 3а слідує, що, як це практично завжди має місце, швидкість певним чином залежить від величини результату. Оскільки в різний момент модифікаційного процесу результат буде різним, то і швидкість стане змінюватись за певним законом (рис. 3б). Таким чином, змінюючи співвідношення швидкості та результату для певного субпроцесу, стає можливим керування внеском цього результату в загальну фазову структуру модифікованого шару.

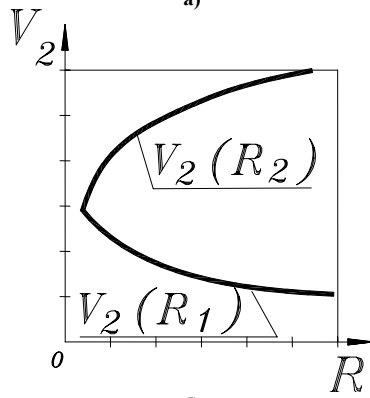


а)



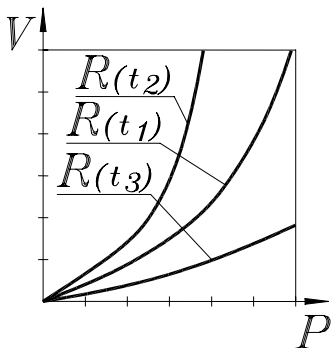
б)

а) залежність швидкості першого субпроцесу від результатів обох субпроцесів, б) залежність швидкості другого субпроцесу від результатів обох субпроцесів, в) зміна результатів обох субпроцесів

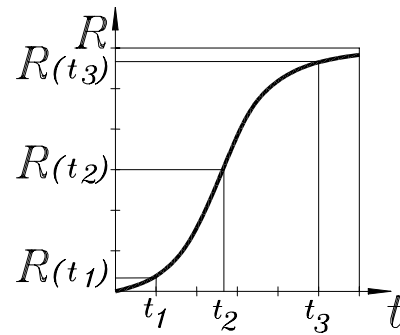


б)

Рис. 2. Взаємовплив результатів та швидкостей субпроцесів

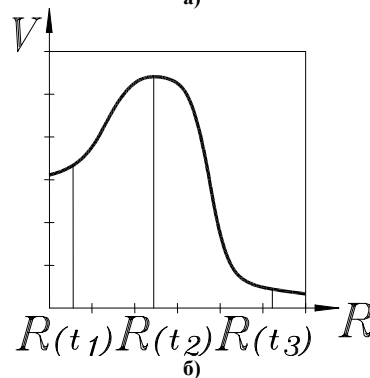


а)



б)

а) залежність швидкості від результату та довільного параметра, б) залежність швидкості від результатів в певний час процесу, в) зміна результатів у часі

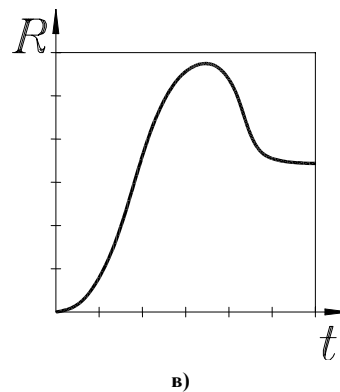
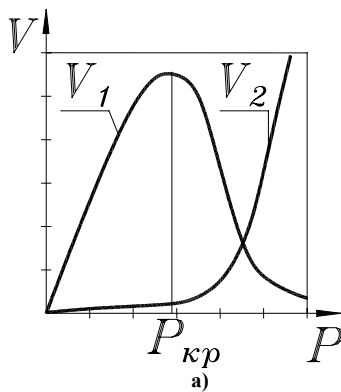


б)

Рис. 3 Характер формування результату залежно від швидкості

Нарешті, ще одним вагомим фактором впливу на кінцеву структуру, а, відповідно, властивості модифікованого шару, є параметри процесу. Особливо це важливо враховувати в тому випадку, безперечно ускладнюючи процедуру управління процесом, коли той чи інший параметр змінюється в часі (рис. 4б), наприклад, при нестационарному живленні розряду коли напруга циклічно змінюється у часі. Розглянемо приклад, коли поверхневий шар формується двома субпроцесами, причому вони взаємно антагоністичні. На рис. 4а показана залежність швидкостей обох субпроцесів від параметра  $P$  (умовно обидва графіки швидкостей показані в додатну область, хоча один з них для неосновного, антагоністичного – наприклад  $V_2$  реально повинен знаходитись у від'ємній, оскільки процес, якому відповідає ця швидкість, руйнує результат першого субпроцесу, умовно прийнятого за основний). Ситуація створення основного результату радикально змінюється після того, як параметр  $P$  перевищить певне критичне значення  $P_{кр}$ , характерне тим, що далі швидкість основного субпроцесу різко зменшується, а швидкість антагоністичного навпаки різко

зростатиме. Прикладом такої пари субпроцесів може служити утворення та розпорошення поверхневого шару нітридів. Кінцевим наслідком взаємної дії двох субпроцесів є результат, показаний на рис.4в, причому міра дії антагоністичного субпроцесу залежить від того, наскільки значно за величиною та у часі параметр  $P$  перевищує критичне значення.



а) залежність швидкостей від параметра, б) зміна параметра у часі, в) зміна результатів у часі

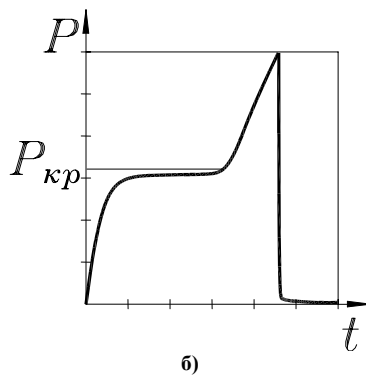


Рис. 3. Характер формування результату при нестационарному параметрові

**Висновок.** Розглянуті та проаналізовані приклади вказують на принципову можливість керованого формування поверхневих модифікованих шарів з врахуванням заданих вимог щодо кінцевих результатів.

### Література

1. Развитие азотирования в России. Низкотемпературная химико-термическая обработка (НХТО) / О.А. Банных, В.М. Зинченко, Б.А. Прусаков, В.Я. Сыропятов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2000. – № 5. – С. 18–26.
2. Зинченко В.М. Инженерия поверхности – путь достижения предельных свойств деталей / В.М. Зинченко // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1999. – № 7. – С. 22–31.
3. Бураковски Т. Инженерия поверхности: состояние и перспективы развития / Бураковски Т. ; [под ред. Фролова К.В.]. – М. : Институт машиноведения им. А.А. Благонравова АН СССР, Международный центр научной и технической информации, 1990. – 95 с.
4. Gabe D.R. Principles of metal surface treatment and protection. – New York: Oxford, Pergamon Press, 1978. – 211 p.
5. Термическая обработка в машиностроении : [справочник] / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. – М. : Машиностроение, 1980. – 783. – С. 345.
6. Каплун В.Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах : дис. ... докт. техн. наук : 05.02.01 / Каплун В.Г. – Хмельницкий, 1992. – 450 с.
7. Edenhofer V. The ion nitriding process thermo chemical treatment of steel and cast iron materials // *Metal and material technological.* – 1976. – Вып. 8. – № 8. – P. 421–426.
8. Keller K. Hochfeste Maschinenteile durch Ionitrieren von Martensitaushartendem Stshl // *Fachberichte fur Oberflachtentechnik,* 1971. – №3. – S. 92–94.
9. Арзамасов Б.Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Арзамасов Б.Н. – М. : Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 1999. – 400 с.
10. Keller K. Jonnitriren steuerbare Oberflächenverfestigung durch Jonnitriren // *Technische Rundschau.* – 1971. – Bd. 63. – № 37. – S. 33–39.
11. Арзамасов Б.Н. Роль удельной мощности разряда при ионной химико-термической обработке сплавов / Б.Н. Арзамасов, Т.А. Панайоти // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2000. – № 6. – С. 31–34.
12. Лахтин Ю.М. Физические основы процесса азотирования / Лахтин Ю.М. – М. : Машгиз, 1948. – 144 с.

13. Новые идеи о механизме образования структуры азотированных сталей / С.А. Герасимов, А.В. Жихарев, Е.В. Березина та ін. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2004. – № 1. – С. 13–18.
14. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка сплавов в активизированных газовых средах / Б.Н. Арзамасов // *Вестник машиностроения*. – 1986. – № 9. – С. 49–53.
15. Лахтин Ю.М. Исследование кинетики процесса азотирования конструкционных сталей / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган // *Электронная обработка материалов*. – 1979. – № 4. – С. 61–64.
16. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И.М. – Харьков : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.
17. Пастух И.М. Класифікаційні критерії процесів азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням / Пастух И.М., Лук'янюк М.В., Курская В.О.. – Хмельницький : Вісник ХНУ, 2011. – № 5. – С. 10–13.

Надійшла 13.8.2011 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Я.Т. Кіницький

УДК 621.81:(621.891+620.194)

В.С. КУРСКОЙ

Хмельницький національний університет

## ТЕОРЕТИЧНА ПЕРЕВІРКА СИЛОВОЇ МОДЕЛІ ПОВЕРХНЕВОГО КОНТАКТУ

*Запропонована силова ймовірнісна модель поверхневого контакту та визначено інтегральні характеристики контактної зони з точки зору довготривалого збереження цілісності спряження.*

*The power likelihood model of surface contact is offered and integrated characteristics of a contact zone from the point of view of long preservation of integrity of interface are defined.*

Ключові слова: поверхневий контакт, контактуючі деталі.

Як відомо, зміна тих чи інших характеристик в поверхневому шару контактуючих деталей в результаті його модифікації, в певній мірі змінює рельєф поверхневого шару. В зв'язку з цим при проектуванні вузлів та конструкцій, елементи з'єднань яких модифікувались, слід враховувати отриманий внаслідок обробки рельєф поверхні та його вплив на експлуатаційні властивості машини в цілому. Макропрофіль поверхні, що утворюється в процесі обробки поверхневого шару високоенергетичними методами, такими як лазерна обробка, електроіскрове легування, має характер регулярних западин та підйомів. Як було зазначено вище, ця особливість рельєфу в значній мірі впливає на розподіл сил тертя в нерухомому з'єднанні в бік підвищення механічної складової. Тому для кількісної та якісної оцінки робочих поверхонь з позиції довготривалого збереження стану номінального зчеплення спряжених деталей на стадії проектування було застосовано методи математичного аналізу для формалізації геометрії поверхні [1–5], які дозволили спростити моделювання одиничного контакту елементів поверхні, а також визначити ймовірнісні характеристики модифікованої поверхні. Для коректного моделювання всієї поверхні виникає питання визначення позиціонування кожного з її елементів. При цьому такі базові характеристики, як координати виступів, кут повороту відносно власної осі, висота та ширина виступу, що є величинами випадковими і підкоряються відповідним законам розподілення [4]. Орієнтовна схема змодельованої площадки показана на рис. 1, де величини кроків  $S$  та значення кутів  $\alpha$  є випадковими величинами.

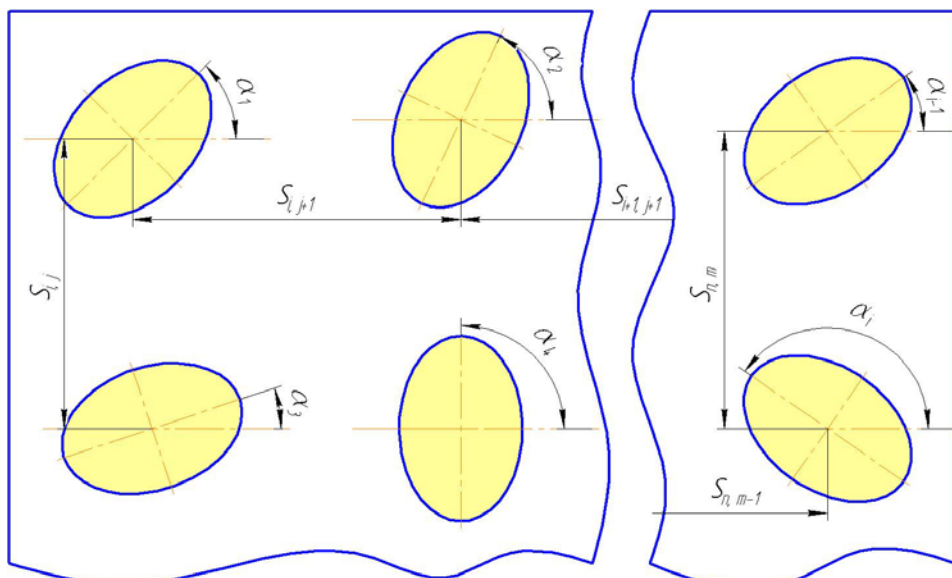


Рис. 1. Схема визначення позицій модельних елементів модифікованої поверхні