

# Інструмент, порошки, пасты

---

*Світлій пам'яті Сергія Іванова  
присвячується*

УДК 519.711.3:621.762.5

**В. А. Дутка** (м. Київ)

## **Про визначення режимних параметрів електронапікання алмазовмісного шару на металічний корпус інструменту на основі оцінки дифузійних процесів**

*Запропоновано проводити визначення режимних параметрів (інтенсивності та тривалості нагрівання) в процесі електронапікання під тиском алмазовмісного шару на корпус на основі оцінки товщини дифузійних шарів, що утворюються в процесі дифузії в зонах контакту з металічним корпусом інструменту частинок порошкових композицій. При цьому використано розроблену раніше чисельну модель електронагрівання технологічного вузла (макромодель) та модель процесу дифузії (мікромодель), в котрій враховано температурну залежність коефіцієнта дифузії. Приведено приклад вибору оптимальних режимів нагрівання для процесу спікання під тиском. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів технологічного процесу спікання виробів із порошкових композицій.*

**Ключові слова:** *комп'ютерне моделювання, процес дифузії, електроспікання під тиском, алмазовмісні матеріали, дифузійний шар.*

В результаті електронапікання під тиском алмазовмісного (робочого) шару на металічний корпус інструменту необхідно забезпечити високі експлуатаційні характеристики (зносостійкість, працездатність і т. п.) шару, міцність з'єднання його з корпусом та одночасно зберегти високу міцність алмазів. Як відомо [1—3], на консолідацію компонентів порошкових сумішей при їх термобаричному навантаженні в процесі спікання під тиском і, як наслідок, на забезпечення високих експлуатаційних характеристик робочого шару та міцність його з'єднання з корпусом інструменту, істотно впливають дифузійні процеси. На міцність алмазів суттєво впливає термічний фактор — високий рівень температури та тривалість спікання. Тому при визначенні режимних параметрів процесу електронапікання під тиском алмазовмісного шару на металічний корпус інструменту доцільно виходити з оцінки дифузійних процесів, що протікають в зоні з'єднання шару з корпусом інструменту, часу досягнення в цій зоні температури утворення інтерметалідів з урахуванням рівня та перепаду температури в алмазовмісному шарі та тривалості процесу спікання. Як показують результати лабораторних експериментів, для досягнення високої міцності з'єднання робочого шару з корпусом

© В. А. ДУТКА, 2008

сом необхідно забезпечити товщину дифузійного шару близько 10 мкм. Тому одним із критеріїв вибору тривалості нагрівання може бути достатня товщина дифузійних шарів. Для отримання високих характеристик міцності та зносостійкості алмазовмісного шару його необхідно спікати в температурному інтервалі 800—1000 °С, при цьому якомога більше мінімізувати перепад температури в шарі. Крім того, для збереження високих характеристик міцності та стійкості алмазів та з метою досягнення високої продуктивності процесу спікання потрібно мінімізувати тривалість спікання.

В даній роботі зроблено спробу визначення режимних параметрів — інтенсивності та тривалості нагрівання — процесу електронапикання під тиском (300 МПа) алмазовмісного шару на сталевий корпус бурової коронки. При цьому враховували товщину дифузійних шарів та рівень температури, необхідний для утворення фаз (інтерметалідів), наявність яких забезпечує необхідну міцність з'єднання робочого алмазовмісного шару з корпусом коронки; рівень та перепад температури в алмазовмісному шарі. Як і в роботі [4], в чисельних експериментах було використано схему технологічного вузла (рис. 1) для електронапикання під тиском алмазовмісного шару на сталевий корпус бурової коронки. Для безалмазної підкладки та алмазовмісного шару використовували порошок титану з розмірами частинок 30—50 мкм, а для забезпечення високої міцності з'єднання підкладки з корпусом коронки нижню частину поверхні корпусу металізували нікелем [5].

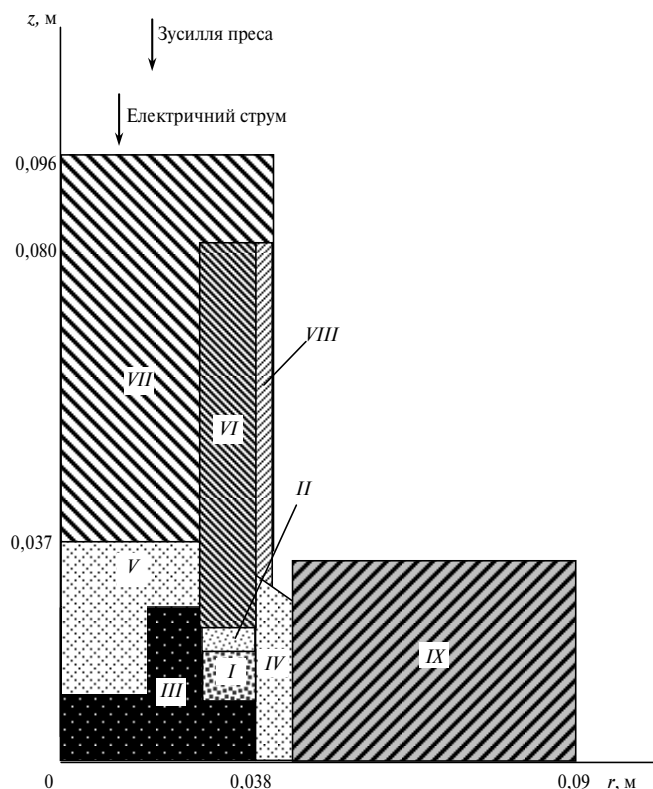


Рис. 1. Схема технологічного вузла (половина осьового перерізу) для електронапикання під тиском алмазовмісного шару на корпус бурової коронки: I — алмазовмісний шар (алмаз і порошок титану), II — безалмазна підкладка (порошок титану), III — графітовий нагрівник, IV — контейнер (літографський камінь), V — теплоізолятор (літографський камінь), VI — корпус коронки (сталь 20), VII — пуансон (сплав EI), VIII — термоміцна оболонка (нержавіюча сталь), IX — матриця (сплав EI).

Дифузійні процеси було розраховано в окремих точках поверхні контакту безалмазної підкладки з корпусом коронки, а також в окремих точках об'єму робочого шару. Схема розрахунку процесу дифузії представлена на рис. 2. При цьому було використано розроблені осесиметричну модель температурного поля в елементах технологічного вузла (макромодель) та одновимірну (по просторовій координаті) модель процесу дифузії в указаних вище точках (мікромодель). В моделі процесу дифузії просторову вісь координат  $Ox$  вибирали перпендикулярною до поверхні контакту компонента 1 з компонентом 2 (рис. 2). В даній роботі, як і в [4], розраховано лише процес дифузії одного компонента в другий.

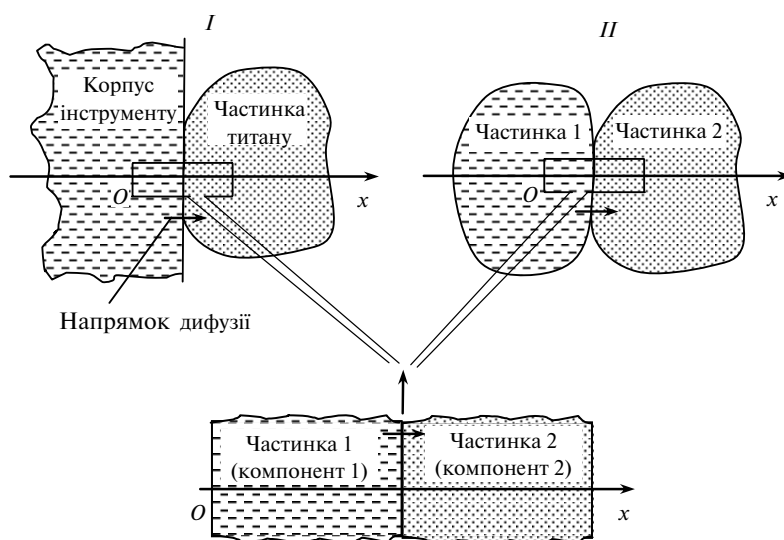


Рис. 2. Одновимірна схема для моделювання процесу дифузії компонента 1 в компонент 2: I — схема контакту корпусу коронки з титановою частинкою підкладки (див. рис. 1), II — схема контакту двох частинок порошкової суміші (титанової підкладки або алмазовмісного шару).

Процедуру розрахунку процесу дифузії було виконано таким чином. Спочатку на кожному кроці по часу розраховували температурне поле в елементах технологічного вузла (див. рис. 1). Потім за обчисленими значеннями температури було розраховано процес дифузії в окремо вибраних точках підкладки та робочого шару, а саме: в точках поверхні напівання титанової підкладки на корпус — дифузію нікелю в титан для оцінки забезпечення міцності з'єднання підкладки з корпусом; в указаних точках та в різних точках об'єму підкладки і робочого шару — дифузію титану в титан для оцінки забезпечення міцності з'єднання титанової підкладки та алмазовмісного шару; в точках об'єму робочого шару — дифузію вуглецю в титан для оцінки забезпечення міцності алмазовмісного шару, зв'язання вільного вуглецю і можливості утворення карбїду.

В обчисленнях тривалість процесу спікання не перевищувала 20 хв, а діючу величину електричного струму в технологічному вузлі змінювали в межах 3300—4600 А. Значення теплофізичних властивостей матеріалів елементів технологічного вузла та титанової підкладки і алмазовмісного шару було вибрано такими, як в [4], а температурну залежність коефіцієнтів дифузії нікелю в титан, титану в титан, вуглецю в титан — згідно з [6].

Як було відзначено вище, при виборі режимних параметрів необхідно приймати до уваги рівень температури в зоні з'єднання безалмазної підкладки з корпусом інструмента та товщини дифузійного шару. Тому для окремих точок корпусу було побудовано графіки зміни температури в часі (рис. 3) та графіки розподілу концентрації нікелю в результаті дифузії нікелю в титанові частинки підкладки (рис. 4) для різних величин струму нагрівання. Із рис. 3 видно, що перепад температури між внутрішньою частиною (точка *A*) і серединою осевого перерізу (точка *B*) поверхні напикання підкладки на корпус коронки в декілька разів більший, ніж перепад між серединою (точка *B*) і зовнішньою частиною (точка *C*) осевого перерізу цієї ж поверхні. Зі збільшенням струму нагрівання від 3300 до 4500 А суттєво (від 60 до 110 °С — в 1,83 раза) зростає перепад температури між крайніми точками *A* і *C* вказаної поверхні в момент досягнення в точці *C* температури 770 °С утворення нікеліду титану. При цьому різниця між моментами часу досягнення в цих точках температури 770 °С зменшується майже вдвічі (від 150 с при  $I = 3300$  А до 70 с при  $I = 4500$  А). Також істотно (майже втричі) зменшується тривалість нагрівання точки *C* до вказаної температури — від 1000 до 350 с. Таким чином, при збільшенні струму нагрівання зростання перепаду температури між точками *A* і *C* відбувається повільніше, ніж зменшення тривалості нагрівання.

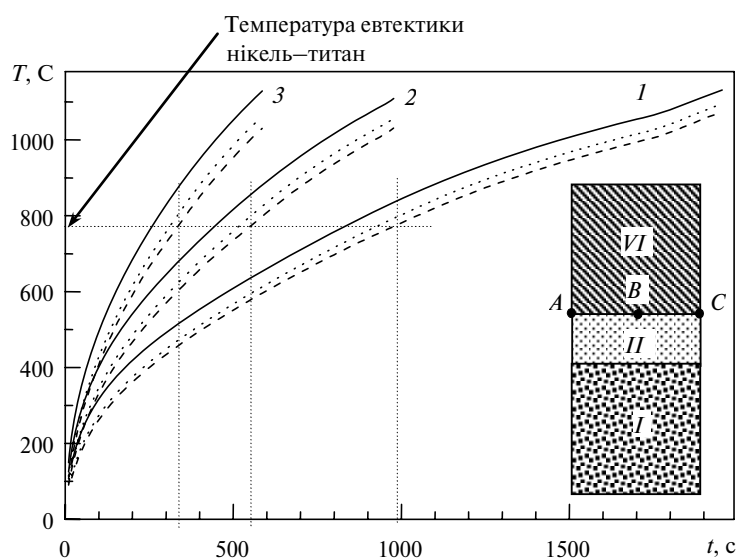


Рис. 3. Зміна в процесі спікання температури в точках *A* (—), *B* (- - -) і *C* (- · -) осевого перерізу поверхні контакту корпусу коронки з підкладкою; на представленому фрагменті технологічного вузла позначення елементів ті ж, що й на рис. 1; криві отримано при діючих величинах струму 3300 (*I*), 3900 (*2*) і 4500 (*3*) А.

Оскільки коефіцієнт дифузії зростає зі збільшенням температури, причому в інтервалі від кімнатної до 1000 °С — на 5—10 порядків [6], то, очевидно, що зі збільшенням інтенсивності нагрівання зростає товщина дифузійного шару. На рис. 4 приведено розподіл концентрації нікелю в титановій частинці на внутрішній та зовнішній боці поверхні напикання для струму нагрівання  $I = 3900$  А в момент часу  $t = 400$  с; аналогічні графіки отримано для  $I = 3300$  А в момент 680 с і для  $I = 4500$  А в момент 250 с. Із рис. 4 видно, що на внутрішній боці поверхні напикання товщина дифузійного шару (~ 15 мкм)

між нікельованим корпусом і титановою частинкою титанової підкладки майже втричі перевищує товщину дифузійного шару на зовнішній боці цієї поверхні. Крім того, з картин розподілу температури в технологічному вузлі (рис. 5) і зокрема в титановій підкладці та в алмазовмісному шарі (рис. 5, б) видно, що в об'ємі титанової підкладки найменша температура досягається на зовнішній боці поверхні напівання титанової підкладки. Звідси випливає, що, вибираючи параметри режимів нагрівання на основі оцінки товщини дифузійних шарів, необхідно використовувати перш за все оцінку товщини шару на зовнішній боці поверхні напівання (див. рис. 4, точка C).

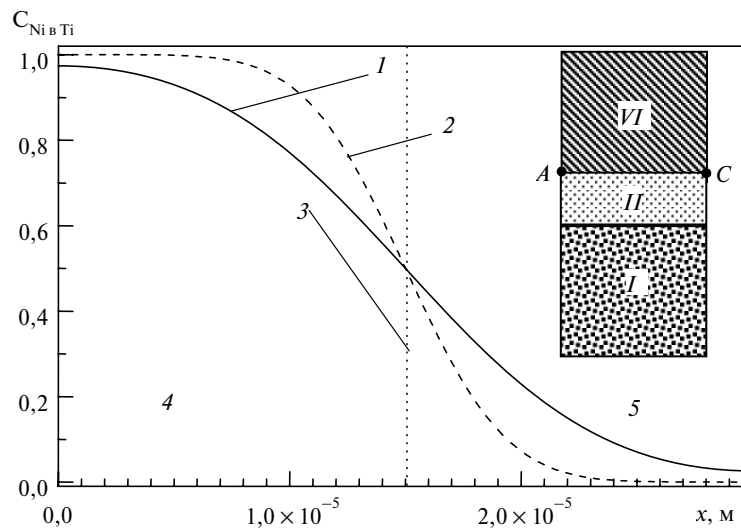


Рис. 4. Розподіл концентрації нікелю в точках A (крива 1) і C (крива 2) поверхні напівання титанової підкладки на корпус коронки в результаті дифузії нікелю в частинку титану в момент часу 400 с ( $I = 3900$  А; 3 — межа контакту покритої нікелем поверхні корпусу коронки і титанової частинки підкладки; 4 — шар нікелю на поверхні корпусу коронки; 5 — титанова частинка).

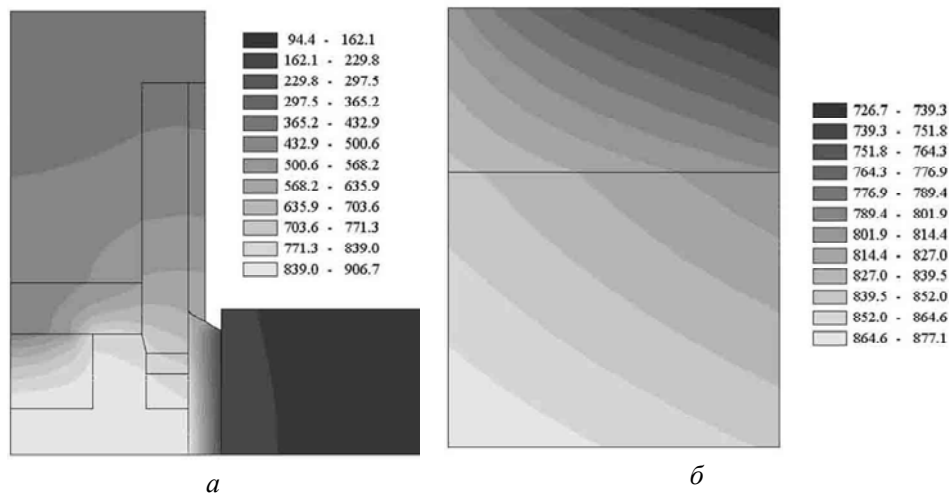


Рис. 5. Розподіл температури в технологічному вузлі (а) і в титановій підкладці та в алмазовмісному шарі (б) в момент часу 490 с при струмі нагрівання 3900 А.

Порівняно з двовимірними графіками розподілу в різні моменти часу концентрації компонента, що дифундує, більш інформативними є тривимірні просторово-часові картини концентрації. Для трьох величин струму нагрівання, що розглядаються, такі картини розподілу нікелю в титановій частинці в точці  $C$  зовнішнього боку поверхні напикання на корпус інструменту (див. рис. 4) приведені на рис. 6. Межа контакту титанової частинки з нікельованою поверхнею копусу позначена на рис. 6,  $a$  пунктиром і має  $x$ -координату, що дорівнює 15 мкм. Із рис. 6,  $a$  видно, що при  $I = 3300$  А в момент часу  $t = 780$  с товщина шару дифузії нікелю в титанову частинку сягає майже 15 мкм. На таку ж глибину при  $I = 3900$  А нікель продифундує за  $\sim 530$  с (рис. 6,  $b$ ), а при струмі нагрівання 4500 А — за 300 с (рис. 6,  $в$ ).

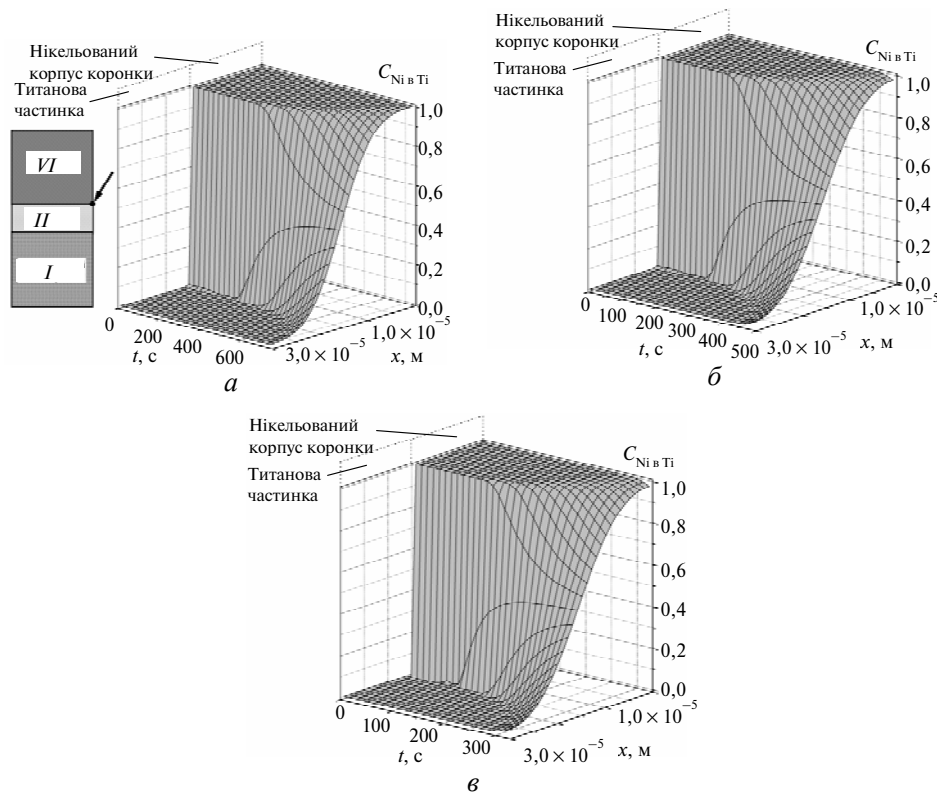


Рис. 6. Просторово-часова картина розподілу концентрації нікелю на зовнішній боці поверхні напикання титанової підкладки на нікельований корпус коронки (в точці, вказаній стрілкою) в результаті дифузії нікелю в титанову частинку; діюча величина струму 3300 ( $a$ ), 3900 ( $b$ ), 4500 ( $в$ ) А; межа контакту корпусу з титановою частинкою позначена штрихом і має  $x$ -координату  $15 \cdot 10^{-6}$  м.

Використовуючи інформацію рис. 6, наприклад, для контуру поверхні зміни концентрації в межах від 0 до 0,01, можна отримати більш повну інформацію про зміну в часі товщини дифузійного шару в результаті дифузії нікелю в титанову частинку підкладки. Відповідні графіки для величин струму нагрівання 3300, 3900 і 4500 А побудовано на рис. 7 (пунктирні лінії). За цими графіками для кожного з режимів нагрівання можна отримати прогнозовані оцінки величини часу нагрівання, протягом якого дифузійні процеси проходять на певну глибину. Так, із рис. 7,  $a$  видно, що дифузія нікелю в титанову частинку на глибину 5 мкм при нагріванні струмом величиною  $I = 4500$  А проходить за 230 с, при  $I = 3900$  А — за 350 с, а при  $I = 3300$  А — за

570 с. Причому при струмі нагрівання 4500 А процес дифузії починається практично з моменту  $t = 100$  с, а при  $I = 3300$  А — з моменту часу 250 с. Аналогічні графіки для процесу дифузії титану в титанову частинку в цій же точці поверхні напикання приведені на рис. 7, б.

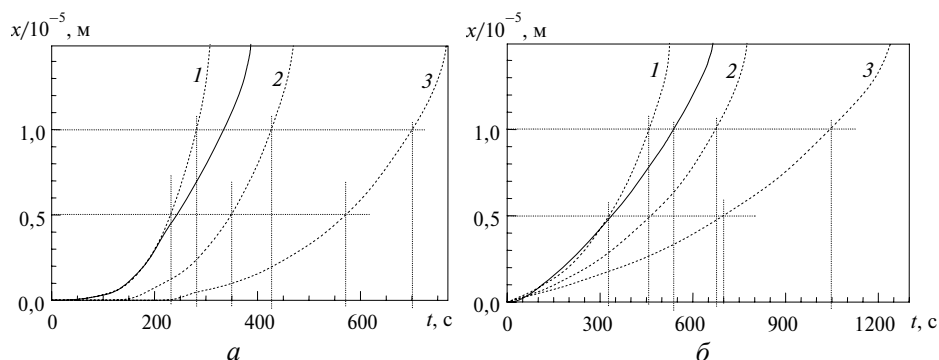


Рис. 7. Зміна в часі товщини дифузійного шару на зовнішнім боці поверхні напикання титанової підкладки на корпус коронки між нікельованою поверхнею корпусу коронки і частинкою титану безалмазної підкладки (а) та між двома частинками титану (б) для  $I = 4500$  (1), 3900 (2), 3300 (3) А; суцільні криві отримані для  $I = I(t)$ , вираз (1).

Із рис. 7 для вказаних трьох режимів нагрівання випливає, що при постійному струмі нагрівання на початку процесу спікання швидкість дифузійних процесів порівняно невелика і суттєво зростає по мірі збільшення тривалості нагрівання. Це пов'язано, очевидно, з тим, що на початковій стадії спікання рівень температури в досліджуваних точках титанової підкладки невисокий, а отже і величина коефіцієнта дифузії недостатня для того, щоб могли початись помітні дифузійні процеси. Зі збільшенням тривалості нагрівання зростає температура, що спричиняє значне зростання коефіцієнта дифузії (на 5—10 порядків), а це, в свою чергу, приводить до суттєвого зростання швидкості дифузії.

При виборі режиму нагрівання необхідно брати до уваги також рівень та перепад температури в робочому шарі в процесі спікання (рис. 8). Із рис. 8 видно, що зі збільшенням величини струму нагрівання від 3300 до 4500 А час нагрівання алмазовмісного шару до температури 800 °С зменшується вчетверо — від 800 до 200 с. Однак при цьому перепад температури в шарі суттєво зростає — від 53 до 85 градусів. Тобто, при переході на більш інтенсивні режими нагрівання починає помітно проявлятися такий негативний фактор, як значне зростання перепаду температури в робочому шарі, що може призвести до небажаного суттєвого зростання неоднорідності його характеристик міцності та зносостійкості. Очевидно, що при виборі параметрів технологічного режиму, зокрема, режиму нагрівання, необхідно вибирати компромісні рішення щодо тривалості нагрівання, забезпечення необхідної температури і товщини дифузійних шарів та допустимого перепаду температури в робочому шарі на важливих стадіях процесу спікання.

Так, якщо для забезпечення високої міцності в зоні з'єднання титанової підкладки з корпусом, а також міцності титанової підкладки і алмазовмісного шару необхідно отримати в зоні напикання та на границі контакту частинок порошкових композицій дифузійний шар товщиною не меншою, ніж 10 мкм, то при нагріванні струмом з постійною діючою величиною  $I = 3300$  А необхідно вибрати тривалість нагрівання 1050 с (див. рис. 7, криві 3). За цей час

на всій поверхні напикання титанової підкладки на корпус коронки досягається температура утворення інтерметаліду TiNi (770 °C) (див. рис. 3). При цьому рівень і перепад температури в алмазовмісному шарі в кінці процесу спікання дорівнюватимуть відповідно 930 і 60 °C (див. рис. 8).

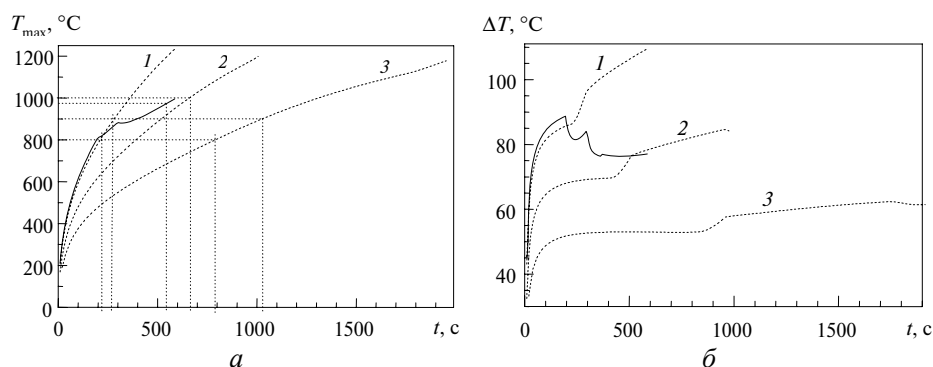


Рис. 8. Зміна в часі максимальної температури (а) та перепаду температури (б) в алмазовмісному шарі при різних режимах нагрівання для  $I = 4500$  (1),  $3900$  (2),  $3300$  (3) А; суцільні криві отримані для  $I = I(t)$ , вираз (1).

При нагріванні струмом більшої (3900 А) величини для отримання товщини дифузійного шару 10 мкм, виходячи із даних рис. 7 (криві 2), необхідно вибрати тривалість нагрівання 670 с (див. рис. 7, б). На цей момент часу температура в алмазовмісному шарі сягне 1000 °C, а її перепад становитиме 80 °C (див. рис. 8).

При режимі з діючою величиною струму 4500 А для отримання вказаної товщини дифузійного шару достатньо вибрати значно меншу, ніж у попередньому випадку, тривалість нагрівання — 450 с (див. рис. 7, криві 1). За цей час температура в алмазовмісному шарі перевищить 1100 °C, а її перепад буде більшим, ніж 110 °C (див. рис. 8, криві 1). Такий режим може бути прийнятним для здійснення процесу спікання з використанням в шарі термостійких алмазів.

Як показують результати проведених чисельних експериментів, тривалість процесу спікання можна істотно зменшити (при умовах забезпечення необхідної товщини дифузійних шарів та досягнення однакових рівня та перепаду температури в алмазовмісному шарі), якщо використовувати змінний в часі режим нагрівання. Для режиму нагрівання зі змінною в часі діючою величиною електричного струму

$$I(t), A = \begin{cases} 4600, & 0 \leq t \leq 200 \text{ c}; \\ 4200, & 200 < t \leq 300 \text{ c}; \\ 3900, & t > 300 \text{ c} \end{cases} \quad (1)$$

на рис. 7 і 8 суцільними лініями приведені результати обчислень товщини дифузійних шарів та рівня і перепаду температури в робочому шарі, а на рис. 9 — криві зміни в часі температури в точках поверхні напикання титанової підкладки на корпус бурової коронки. Із кривих рис. 7 видно, що при даному режимі нагрівання дифузія нікелю в титанову частинку в точці С (див. рис. 4) на глибину 10 мкм проходить менше, ніж за 350 с, а дифузія між двома титановими частинками підкладки в цій же точці на таку ж глибину проходить за 540 с. Звідси випливає, що тривалість нагрівання потрібно виб-



рати не меншою, ніж 540 с. На цей момент часу рівень температури в алмазовмісному шарі досягне 970 °С (див. рис. 8, *a*), а перепад температури становитиме близько 77 градусів (див. рис. 8, *б*). Тобто, при даному режимі нагрівання рівень і перепад температури є нижчими, ніж при режимі з постійною діючою величиною струму рівною 3900 А, а тривалість нагрівання є значно (майже на 20 %) меншою. Із рис. 9 видно, що протягом вказаної тривалості нагрівання (540 с) на всій поверхні напикання підкладки на корпус коронки досягається температура утворення інтерметаліду нікеліду титану, що сприяє забезпеченню міцності з'єднання алмазовмісного шару з корпусом коронки. Таким чином, на основі оцінки товщини дифузійних шарів можна суттєво оптимізувати процес напикання алмазовмісних композицій на інструмент.

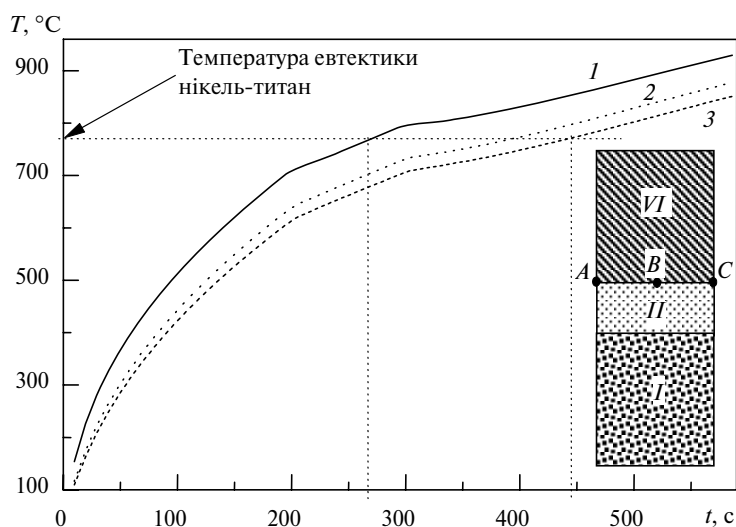


Рис. 9. Зміна в процесі спікання температури в точках осьового перерізу поверхні контакту корпусу з підкладкою при змінній в часі величині струму нагрівання  $I(t)$  (вираз (1); на представленому фрагменті технологічного вузла позначення елементів ті ж, що й на рис. 3; 1, 2, 3 — температура в точках А, В і С відповідно.

Крім вказаних вище розрахунків дифузії нікелю в титанову частинку та титану в титанову частинку були виконані також обчислення дифузії вуглецю в титанову частинку в різних точках об'єму робочого алмазовмісного шару. Коефіцієнт дифузії вуглецю в титан значно більший, ніж коефіцієнти дифузії нікелю в титан та титану в титан [6]. Як показали результати обчислень, товщина 10 мкм дифузійного шару в результаті дифузії вуглецю в титанову частинку було досягнуто значно скоріше, ніж для дифузії нікелю в титанову частинку чи титану в титанову частинку. Тому в проведеному вище чисельному аналізі по вибору режимів нагрівання не було необхідності розглядати результати обчислень дифузії вуглецю в титанову частинку.

Слід зазначити, що приведена в даній роботі процедура вибору режимів нагрівання на основі оцінки товщин дифузійних шарів є лише наступним кроком до управління процесом електроспікання під тиском робочих елементів інструменту. Для побудови більш повної схеми управління необхідно враховувати процеси само- та взаємодифузії між компонентами порошкових композицій, що спікаються; крім дифузійних процесів враховувати хімічну взаємодію компонентів, тепловиділення в результаті реакцій і т. д.

Таким чином, запропоновано проводити визначення режимних параметрів в процесі електронапікання під тиском алмазовмісного шару на корпус інструменту на основі оцінки товщин дифузійних шарів, що утворюються в процесі дифузії в зонах контакту з металічним корпусом інструменту частинок порошкових композицій. Показано, що шляхом вибору змінних в часі режимів нагрівання при умові врахування товщини дифузійних шарів можна істотно оптимізувати процес спікання алмазовмісних виробів.

1. *Скороход В. В., Солонин Ю. М., Уварова И. В.* Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых материалов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 248 с.
2. *Pan J., Cock A., Kucherenko S.* Finite element formulation of coupled grain-boundary and surface diffusion with grain-boundary migration // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1997. — N 453. — P. 2161—2184.
3. *Zhang W., Gladwell I.* Sintering of two particles by surface and grain boundary diffusion. — A three-dimensional model and a numerical study // Comput. Mater. Sci. — 1998. — N 12. — P. 84—104.
4. *Дутка В. А., Майстренко А. Л., Иванов С. А., Переяслов В. П.* Оцінка дифузійних процесів при електронапіканні під тиском алмазовмісного шару на металічний корпус інструменту // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. (за напрямом “Інженерна механіка”). — Луцьк, 2007. — Вип. 20. — С. 151—158.
5. *Бугаков В. И, Коняев Ю. С.* Высокоэффективный алмазный инструмент, изготовленный по оригинальной технологии с применением высоких давлений и температур, новых связей и алмазных материалов // Сверхтв. материалы. — 2001. — № 6. — С. 54—63.
6. *Лариков Л. Н., Исайчев В. И.* Структура и свойства металлов и сплавов. Диффузия в металлах и сплавах: Справ. — Киев: Наук. думка, 1987. — 510 с.

Ін-т надтвердих матеріалів  
ім. В. М. Бакуля НАН України

Надійшла 04.09.07