

ВПЛИВ АКТИВАТОРІВ НА ПРОЦЕС ДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ SiC ТА MoSi₂ КРЕМНІЄМ І БОРОМ

У роботі досліджується процес дифузійного насичення карбіду кремнію та дисиліциду молібдену. Таку обробку можна рекомендувати для металів і сплавів, щої експлуатуються при високих температурах.

Силіціювання та борування реакційноспеченого карбіду кремнію і дисиліциду молібдену в сумішах з низьким вмістом дифузійного джерела при температурі 1000 - 1100 °С сприяє відновленню диоксиду кремнію й утворенню на їх поверхні гексабориду кремнію. Але процес насичення досить повільний, тому необхідно підвищити активність силіцидного та боридного дифузанта. Інтенсифікувати процес дифузійного насичення кераміки кремнієм і бором можна впровадженням у насичувальне середовище активуючих додатків, що виконують такі функції: 1) при нагріванні продукти випаровування або розкладу активатора витісняють повітря з об'єму контейнера; 2) взаємодіють з поверхнею матеріалу, що обробляється, і насичувальним компонентом; 3) ліквідовують або відновлюють оксидні плівки; 4) утворюють у реакційному об'ємі газову фазу, з насичувальним елементом, і перенесуть його до насичуваної поверхні.

Структура, хімічний склад і швидкість зростання дифузійного покриття, а також його якість визначаються хімічним складом, кількістю і способом введення активатора [1].

Використання силіцидних сумішей, що містять 40 % кремнію, дозволяє зменшити у керамічних виробках кількість диоксиду кремнію і цим поліпшити їх експлуатаційні характеристики. Інтенсифікувати процес силіціювання можна шляхом введення в насичувальне середовище різних і в різному співвідношенні активуючих додатків [2]. Високі активуючі властивості мають фториди лужних і лужно-земельних металів [3]. Вони утворюють газові фази, що відновлюють оксидні плівки, які покривають поверхню насичувальних компонентів і виштовхують повітря з об'єму контейнера. Механізм дії галогенних сполук однаковий. Вони створюють у реакційному об'ємі рівноважну або близьку до рівноважної газову фазу з високим парціальним тиском парів галогенідів насичувального компонента, транспортом якого є галоген у складі сполуки-активатора.

У зв'язку з цим досліджено вплив фтористого натрію і фтористого алюмінію на процес силіціювання реакційноспеченого карбіду кремнію та дисиліциду молібдену в суміші з 40 % кремнію. Концентрацію активаторів змінювали від 1 до 10 %.

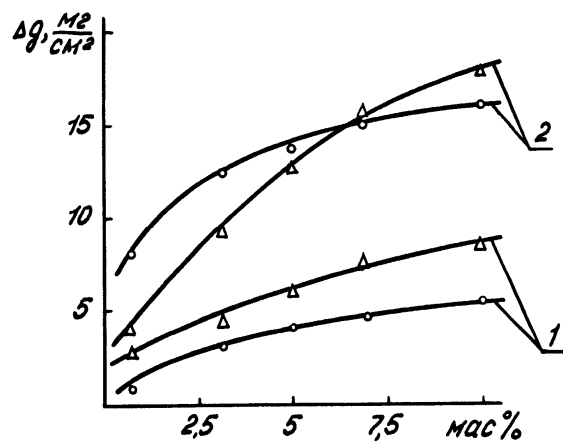


Рис. 1. Залежність питомого збільшення ваги (Δg) керамічних зразків на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену від кількості фтористих активаторів ($T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, Si-40\% , $\tau=8$ год.).
1-SiC; 2-MoSi₂; о-NaF; Δ-AlF₃.

Результати досліджень виявили, що при введенні в суміш активуючих додатків підвищуються насичувальні властивості суміші (рис. 1). У всьому інтервалі зміни концентрації фтористий алюміній інтенсивно впливає на збільшення питомого приросту ваги (Δg) карборундових зразків. Силіціювання карбідокремнієвої кераміки у сумішах, з понад 5 % фтористого активатора приводить лише до незначного зростання ваги зразків. Зовсім інша картина при силіціюванні кераміки на основі дисиліциду молібдену. Швидкість її насичення кремнієм різко зрос-

МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

тає з підвищенням у суміші концентрації фтористого алюмінію. При використанні фтористого натрію вага зразків збільшується при його введенні у суміш до 3 %. Дальше підвищення концентрації активатора (понад 5 %) приводить лише до незначного зростання (Δg). Поряд з цим, введення у суміш 3 % NaF або AlF_3 суттєво впливає на активність суміші, зокрема, частинки суміші припікаються до поверхні кераміки. Використання силіцидної суміші з 7 % активатора приводить до її спікання, що перешкоджає відокремленню зразків. Таким чином, найбільш доцільно використовувати силіцидну суміш, що містить до 3 % фтористого активатора.

Для пояснення механізму активуючої дії (наприклад) фтористого натрію використано термодинамічний розрахунок фазового складу газового середовища з участю таких передумов.

1. Взаємодія кремнію з NaF приводить до утворення галоїдних сполук кремнію SiF_n ($n=1,2,3,4$) і натрію.

2. Протягом всього процесу силіціювання у системі присутня конденсована фаза сполука-активатор. Крім цього, необхідно пам'ятати [4], що у газовому середовищі знаходяться лише одноатомні молекули натрію.

У процесі силіціювання керамічних матеріалів у суміші кремній-фтористий натрій буде виконуватися рівність:

$$\sum P_{SiF_n(r)} = P_{Na(r)}, \quad (1)$$

де $\sum P_{SiF_n(r)}$ – сумарний тиск газоподібних фторидів кремнію.

Звичайно:

$$\sum P_{SiF_4(r)} = P_{SiF_1} + 2P_{SiF_2} + 3P_{SiF_3} + 4P_{SiF_4} \quad (2)$$

На основі констант рівноваги реакцій утворення фторидів кремнію можна визначити:

$$P_{SiF_n} = P_{Si(r)} \cdot P_{F(r)} \cdot KP_{SiF_n(r)}, \quad (3)$$

де $KP_{SiF_n(r)}$ - константа рівноваги реакції утворення газоподібного фториду кремнію з газоподібних одноатомних компонентів.

Величина тиску газоподібного натрію визначається виразом:

$$P_{Na(r)} = \frac{KP_{NaF} \cdot P_{NaF}(r)}{PF(r)}, \quad (4)$$

де KP_{NaF} – константа рівноваги реакції дисоціації $NaF(r) \rightarrow Na(r) + F(r)$, $P_{NaF}(r)$ – тиск парів NaF, із врахуванням присутності конденсованої фази активатора, вважається, що він дорівнює тискові насичених парів.

Подаючи рівність (3) і (2) та прирівнюючи праву частину (3) і (4), отримаємо рівняння поліномного виду:

$$A_1 P_{F(r)}^5 + A_2 P_{F(r)}^4 + \dots + A_5 P_{F(r)} + A_6 = 0, \quad (5)$$

де $A_i |_{i=6} = (i-1)P_{Si} \cdot KP_{SiF_{i-1}}$, $A_6 = -KP_{NaF} - P_{NaF}$.

Розв'язок рівняння (5) відносно $P_{F(r)}$ дозволив за допомогою (3) визначити парціальні тиски всіх фторидів кремнію. Необхідні величини констант рівноваги і тисків насичених парів взяті з роботи [5]. Результати термодинамічного розрахунку для системи Si-NaF виявляють, що основними компонентами газової фази є нижчі фториди: SiF_2 і SiF_3 , а серед них - дифторид кремнію, поряд з цим термодинамічно він менш стійкий порівняно з вищими (табл. 1).

Таблиця 1.

Вільна енергія Гіббса утворення газоподібних фторидів кремнію

Вільна енергія Гіббса	Сполуки			
	SiF	SiF ₂	SiF ₃	SiF ₄

$-\Delta G_{298}$, кДж/моль	92,2	632,6	984,6	1575,4
------------------------------	------	-------	-------	--------

При нагріванні контейнера у силіцидній суміші кремній взаємодіє з фтористим натрієм і відбувається така реакція:



де $n = 1, 2, 3, 4$.

На поверхні оброблюваної кераміки адсорбуються газофазні продукти взаємодії з наступним диспропорціонуванням нижчих фторидів кремнію за реакцією:



де $n = 1, 2, 3$, а потім тетрафторид кремнію взаємодіє з порошком кремнію за реакцією:



Можна припускати, що в основному переноситься маса кремнію з порошкової суміші до поверхні кераміки за рахунок утворення дифториду кремнію та його диспропорціонування на поверхні кераміки на кремній і тетрафторид, який за реакцією (8) утворює дифторид. Таким чином, цикл масоперенесення кремнію замикається. У даному випадку відбувається хімічне транспортування кремнію завдяки різниці хімічних потенціалів кремнію у газовій фазі та монооксиді утворюваного кремнію.

Можна припустити, що при силіціюванні реакційно-спеченої кераміки на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену в контейнері з плавким затвором у суміші, з фтористим натрієм, зовнішнє перенесення кремнію у газовій фазі відбуватиметься так само, як описаному вище, і адсорбована рівновага кремнію на поверхні кераміки залежить від швидкості дифузії кремнію у глибину основи. Отже, фтористий натрій сприятиме прискоренню процесу силіціювання керамічних матеріалів, тобто відновленню диоксиду кремнію.

Метали і сплави дифузійно насичують у водневих середовищах, що забезпечує високу швидкість насичення та хорошу якість оброблюваної поверхні [6]. У зв'язку з цим досліджено можливість використання як активуючі добавки гідриди металів IV-а групи, зокрема, гідрид титану, який при температурі насичення розкладається з утворенням атомарного водню [7].

Вивчення процесу силіціювання кераміки з використанням гідриду титану, кількість якого змінювали від 1 до 10 % [8], виявило, що вміст гідриду титану в суміші по-різному впливає на швидкість процесу насичення. При силіціюванні дисиліциду молібдену в сумішах, з 5 % TiH_2 і менше, зміна Δg незначна і становить 3 - 4 мг/см^2 . Дальше збільшення у порошковому середовищі концентрації гідриду титану приводить до різкого прискорення процесу насичення, про що свідчать величини питомого приросту ваги зразків (рис. 2). Силіціювання карбіду кремнію з використанням TiH_2 виявляє, що зростання Δg дуже повільне і становить не більше, як 1 мг/см^2 . Насичення кераміки кремнієм у сумішах, з 10 % і більше гідриду титану приводить до розгерметизації контейнера та порушення процесу силіціювання. У зв'язку з цим найбільш доцільним є використання сумішей, які містять до 7 % гідриду титану.

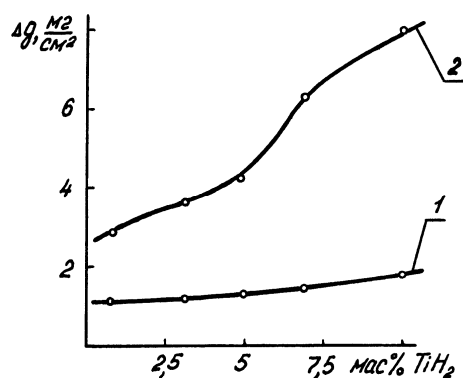


Рис. 2. Залежність питомого приросту ваги (Δg) зразків від кількості гідриду титану в суміші ($\text{Si}-40\%$, $T=1100^\circ\text{C}$, $\tau = 8$ год.). 1 - SiC ; 2 - MoSi_2 .

Аналіз отриманих результатів досліджень дозволяє припустити, що для інтенсифікації процесу силіціювання SiC та MoSi_2 у насичувальну суміш можна вводити як активуючі добавки фтористий активатор та гідрид титану. Для визначення ефективності спільної дії обидвох активаторів вивчали

МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

процес насичення кераміки кремнієм у середовищах з фтористим активатором 1, 3 і 5 %, а також гідридом титану, кількість якого у всіх дослідах була постійною - 7 %. Встановлено, що найбільший питомий приріст ваги зразків карбіду кремнію та дисиліциду молібдену при введенні у насичувальне середовище фтористого натрію - 3 % і гідриду титану - 7 % (табл. 2). Порівняння ефективності дії суміші активаторів NaF + TiH₂ і AlF₃ + TiH₂ виявило, що при концентрації активаторів до 3 % приріст ваги зразків карборундової та дисиліцид молібденової кераміки збільшується приблизно у 1,5 раза, на відміну від зразків, що силіціювалися за участю тільки фтористого натрію. Суміші з містять 5 % і більше фтористого активатора приводять до порушення процесу насичення. За результатами рентгенофазового аналізу, при використанні комбінованого активатора (NaF + TiH₂) у процесі силіціювання реакційноспеченого карбіду кремнію та дисиліциду молібдену кількість диоксиду кремнію зменшується на 10-15 % порівнянно з процесом насичення, в якому використовували як активатор лише фтористий натрій. Силіцидні суміші фтористим натрієм і гідридом титану забезпечують збільшення у 1,5 раза Δg зразків порівняно з використанням суміші, у складі якої є фтористий алюміній і гідрид титану.

Вивчення впливу експозиції на швидкість процесу силіціювання кераміки виявило, що із збільшенням тривалості насичення від 2 до 12 годин питомий приріст ваги карборундових керамічних зразків різко зростає, поряд з цим дисиліцид молібденових лише незначно збільшується. Силіціювання реакційноспеченого карбіду кремнію та дисиліциду молібдену тривалістю понад 12 годин приводить до спікання суміші.

Таким чином, дослідження дозволили виробити економічний техпроцес силіціювання кераміки у середовищі з 40 % кремнію, 3 % NaF, 7 % гідриду титану та рештою оксиду алюмінію. Температура процесу не вища за 1100 °C, а тривалість насичення не повинна перевищувати 12 годин [9].

Таблиця 2.

Залежність питомого приросту ваги зразків від кількості фтористого активатора

Активатор/вміст, %	Δg , мг/см ²	
	SiC	MoSi ₂
NaF/1	4,8	11,2
NaF/3	6,0	16,0
AlF ₃ /1	3,2	10,8
AlF ₃ /3	5,6	14,0

Використання боридних сумішей з 20 % аморфного бору забезпечує одержання на карбідокремнієвій та дисиліцид молібденовій кераміці боридного покриття, проте насичувальна здатність суміші дуже мала. Для інтенсифікації процесу борування можна використовувати сполуки, що виконують функції активаторів, компонентами для них можуть служити фториди лужних і лужно-земельних металів, що виконують всі

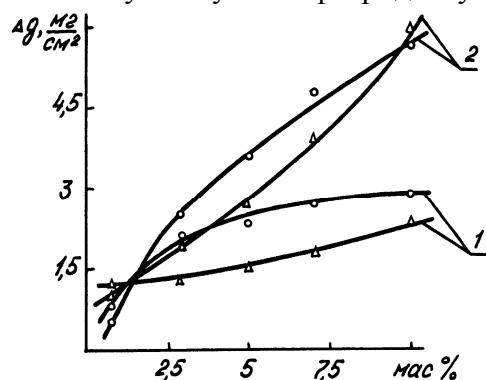
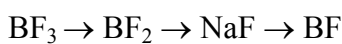


Рис. 3. Вплив фтористого натрію (о) і алюмінію (Δ) на зміну питомого приросту ваги (Δg) зразків карбіду кремнію та дисиліциду молібдену після насичення бором (B-20 %, T=1100 °C, τ =8 год.).
1 - SiC; 2 - MoSi₂.

функції речовин-активаторів, наприклад, NaF або AlF₃. Показники теплоти утворення галогенідів бору свідчать про те, що термодинамічно найбільш стійкими є BF₂ і BF₃ [10,11]. Значить, вони найкращі для активації процесу борування. Механізм дії галогенних активаторів однаковий і полягає у створенні в реакційному об'ємі рівноважної або близької до рівноважної газової фази з високим парціальним тиском парів галогенідів насичувального компонента, транспортом якого є галоген у складі з'єднання-активатор.

У зв'язку з цим для підвищення насичувальної здатності боридної суміші досліджували ефективність використання як активаторів фтористого натрію і алюмінію, концентрацію яких змінювали від 1 до 10 %, а концентрація аморфного бору не перевищувала 20 %. При концентрації активаторів до 3 % (рис. 3) збільшення ваги зразків карбіду кремнію та дисиліциду молібдену однакове. Як показали результати металографічного дослідження реакційноспеченого дисиліциду молібдену, при використанні фтористого активатора (NaF або AlF₃) на поверхні матеріалу утворюється тонкий шар ~ 50 ± 5 мкм гексабориду кремнію, добре з'єднаний з основою. Дальше підвищення їх концентрації (понад 3 %) приводить до різкого зростання ваги зразків, особливо для дисиліцид молібденової кераміки. Питомий приріст ваги зразків карбіду кремнію незначний. Збільшення вмісту активаторів у боридному середовищі приводить до підвищення насичувальної здатності, але при цьому відбувається припикання порошкової суміші до поверхні зразків і її спікання. Використання насичувальних середовищ, з понад 3-ма відсотками фтористих активаторів недоцільне, оскільки відокремлювати зразки від суміші неможливо. Таким чином, введення у боридне середовище понад 3 % фтористих активаторів не сприяє формуванню на керамічних матеріалах якісного покриття.

Схема інтенсифікації процесу борування кераміки у суміші, що містить аморфний бор і фтористий натрій, така. При насиченні в об'ємі контейнера утворюються атоми фтору, що взаємодіють з аморфним бором, внаслідок чого утворюються фториди бору. Маспектричними дослідженнями встановлено, що у газовій фазі міститься значна кількість нижчих фторидів [12], саме тоді, коли вони термодинамічно менш стійкі, ніж вищі (табл. 3). Порівняльний аналіз термодинамічних властивостей галогенідів бору і натрію у роботі [13] свідчить, що міцність газоподібних галогенідів бору і натрію зменшується у напрямку:



Таблиця 3

Вільна енергія Гіббса утворення газоподібних фторидів бору [14]

Вільна енергія Гіббса	Сполуки		
	BF	BF ₂	BF ₃
-ΔG ₂₉₈ , кДж/моль	146,7	515,4	1123,0

Далі нижчі фториди бору взаємодіють на поверхні кераміки з утворенням більш стійких фторидів бору і атомарного бору, який адсорбується основою, у результаті чого формується покриття з гексаборидом кремнію. Переважне утворення активних атомів бору залежатиме від відносної термодинамічної міцності тих фторидів бору, за рахунок яких відбувається транспортування. Таким чином, активуючу дію фторидів бору при насиченні кераміки можна подати як реакцію диспропорціонування:



де $y > x$.

Відповідно, відбувається галогенне транспортування бору. Поряд з цим, слід відзначити, що у газовій фазі боридної суміші знайдені оксиди бору: BO, B₂O₂ і B₂O₃ [11].

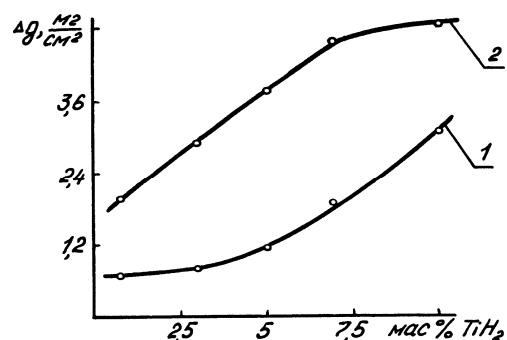


Рис. 4. Залежність питомого приросту ваги (Δg) зразків від вмісту суміші TiH₂ (B-20 %, Al₂O₃-решта, T=1100 °C, τ=8 год.).
1 - SiC; 2 - MoSi₂.

Таким чином, досліджувана інтенсифікація процесу насичення керамічних матеріалів бором є наслідком спільної дії двох механізмів – кисневого та галогенного.

Як відомо, дифузійне насичення виконують у водневих середовищах [6]. У зв'язку з цим у роботі досліджували можливість використання як активуючі добавки гідриди металів IV-а гру-

пи, зокрема, гідриду титану, що при температурі борування розкладається з утворенням атомарного водню [7].

Дослідження процесу борування реакційноспеченої кераміки на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену з використанням гідриду титану, кількість якого змінювали від 1 до 10 %, виявило, що введення в суміш TiH_2 суттєво впливає на процес насичення. Із збільшенням у порошковому середовищі концентрації гідриду титану у 1,5 раза підвищується насичувальна здатність суміші порівняно з використанням фтористих активаторів (рис. 4). Дифузійні процеси, що відбуваються у сумішах, з 10 % TiH_2 , приводять до розгерметизації контейнера і порушення процесу насичення. Тому найбільш доцільно використовувати суміші, що містять до 7 % гідриду титану.

Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити висновок, що для інтенсифікації процесу борування керамічних матеріалів у насичувальну суміш необхідно вводити як активуючі добавки фтористий активатор і гідрид титану. Для визначення ефективності спільної дії обидвох активаторів вивчали процес насичення карбіду кремнію та дисиліциду молібдену в середовищах з аморфним бором 20 %, фтористим активатором 1, 3 і 5 %, а кількість гідриду титану у всіх дослідах була постійною - 7 %. Встановлено, що найкраща насичувальна здатність боридної суміші досягається при використанні 3 % фтористого натрію та 7 % гідриду титану, про що свідчать величини питомого приросту ваги зразків реакційноспеченої кераміки (табл. 4). Порівняння величин питомого приросту ваги зразків карборундової та дисиліцид молібденової кераміки свідчить про те, що борування в сумішах, які містять фтористий натрій і гідрид титану, відбувається найбільш ефективно.

Таблиця 4.

Залежність питомого приросту ваги зразків від кількості фтористих активаторів

Активатор/вміст, %	Δg , мг/см ²	
	SiC	MoSi ₂
NaF/1	2,2	5,35
NaF/3	4,05	7,2
AlF ₃ /1	2,8	5,43
AlF ₃ /3	3,0	6,45

Питомий приріст ваги зразків зростає у 2 рази порівняно з насиченням у суміші, що містить тільки фтористий натрій. Використання сумішей, що містять 5 % і більше фтористого натрію погіршує процес насичення. Таким чином, використання боридних сумішей з NaF і TiH_2 , найбільш доцільне.

Вивчення впливу експозиції на швидкість процесу борування керамічних матеріалів виявило, що із збільшенням тривалості насичення від 2 до 12 годин питомий приріст ваги зразків зростає приблизно однаково. Борування реакційноспеченого карбіду кремнію та дисиліциду молібдену тривалістю понад 12 годин приводить до спікання суміші, що перешкоджає відокремленню зразків.

Дослідження мікроструктури зразків дисиліциду молібдену після борування виявили, що в результаті використання комплексного активатора ($NaF + TiH_2$) на поверхні кераміки утворюється шар гексабориду кремнію товщиною $\sim 90 \pm 5$ мкм, що в 2 рази перевищує товщину боридного шару, отриманого при використанні лише фтористого натрію. Як виявляють результати рентгенофазового аналізу, при використанні комбінованого активатора ($NaF + TiH_2$) у процесі борування реакційноспеченого карбіду кремнію та дисиліциду молібдену кількість диоксида кремнію зменшується на 10 % порівняно з процесом насичення, в якому використовували як активатор лише фтористий натрій.

Обговорення результатів досліджень. На основі всебічного вивчення активуючої дії додатків, що вводяться в насичувальне середовище, під час дифузійного насичення карборундової та дисиліцид молібденової кераміки кремнієм і бором встановлено, що насичувальна здатність як силіцидної так і боридної суміші підвищується найбільш інтенсивно при введенні у них фтористого натрію і гідриду титану. Вони забезпечують масоперенесення елемента, що дифундує з порошкової суміші до поверхні кераміки за рахунок утворення фторидів насичувальних елементів з дальшим диспропорціонуванням і утворенням атомарного кремнію та бору, що дифундує у глибину кераміки і взаємодіють з основою. Такий процес сприяє відновленню диоксиду кремнію і утворенню на поверхні гексабориду кремнію товщиною $\sim 90 \pm 5$ мкм, а також дозволяє використовувати суміші з низьким вмістом дифузійного джерела.

Висновки. Проведені дослідження свідчать, що для розробки ресурсо- і енергозберігальних технологій борування керамічних матеріалів можна рекомендувати боридну суміш, з 20 % аморфного бору, 3 % фтористого активатора, 7 % гідриду титану, а решта інертний наповнювач (один із тугоплавних оксидів: Al_2O_3 , MgO , $ZrSiO_4$). Температура процесу - до $1100^\circ C$, а тривалість - до 12 годин.

The sintering process of diffusion saturation of carbide-silicic and dysilicid molybdenum. This processing are recommending for metals and alloys, which are exploiting by high temperatures.

Література

1. Сосновский Л.А., Деркач В.Д., Эпик А.П. Влияние активирующих добавок на процессы диффузионного насыщения // Порошковая металлургия. -1973.-№12.-С.41-48.
2. Сосновский Л.А., Эпик А.П., Деркач В.Д. Применение активаторов в процессах диффузионного контактного насыщения металлов в порошках // Защитные высокотемпературные покрытия.-Л.: Наука, 1972.-С.-22-33.
3. Рябченко Е.В., Арзамасов Б.Н., Прокошкин Д.А. Термодинамический анализ процесса силицирования молибдена // Защитные покрытия на металлах.-К.: Наукова думка, 1967.-Вып.1.-с.-92-97.
4. Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов.- М.:Изд-во АН УССР, 1961.-369 с.
5. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник / Под ред. В.М. Глушко.-М.: Изд-во АН СССР, 1962.-Т.2.-341 с.
6. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. - М.: Металлургия, 1973.- 400 с.
7. Антонова М.М. Свойства гидридов металлов: Справочник. - К.: Наукова думка, 1975.-128 с.
8. А.с. 1650776 СССР. Способ обработки чугушной оснастки / Ю.В. Дзядыкевич, И.И. Бочар, Н.И. Заблоцкая и др. // Открытия. Изобретения.- 1991.-№ 19.- С.116.
9. Патент 30240 А України, С04В35/56. Спосіб обробки виробів із карбиду кремнію та дисиліциду молібдену / Дзядыкевич Ю.В., Бочар І.Й., Горбатюк Р.М. (Україна).-№ 98020580; Заявлено 03.02.1998; Опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6-11.
10. Сосновский Л.А., Эпик А.П., Крапля А.П. Диффузионное борирование молибдена и ниобия в порошке карбида бора // Порошковая металлургия.- 1972.-№ 9.-С. 75-78.
11. Уикс К.Е., Блок Ф.Е. Термодинамические свойства 65 элементов и их окислов, галогенидов, карбидов и нитридов.-М.: Металлургия, 1965.-240 с.
12. Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.Л. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ.-М.: Металлургия, 1968.-278 с.
13. Феночка Б.Л., Гордиенко С.П., Астахова Ж.А. Масс-спектрометрические исследования реакций переноса элементов покрытия //Диффузионное насыщение и покрытия на металлах.-К.: Наукова думка, 1983.-С.36-40.
14. Гордиенко С.П., Феночка Б.В. Термодинамическая устойчивость галогенидов бора, кремния, натрия и алюминия, применяемых для диффузионного насыщения // Защитные покрытия на металлах.-К.: Наукова думка, 1985.- Вып.19.-С. 8-10.

Одержано 02.02.2001 р.