

Виявлення особливостей отримання покриттів різної твердості на конструкційній сталі при дифузійній металізації

О. Є. Марков, Ю. Г. Дьяченко, Л. І. Алієва, С. В. Жаріков, Н. С. Грудкіна, В. І. Бондаренко, М. Г. Погорелов

Вивчено особливості одержання покриттів на вуглецевій, конструкційній сталі Ст 3 при дифузійній металізації – одночасному насиченні сталі бором, хромом і алюмінієм (борохромоалітування) без використання спеціальної термічної обробки. Встановлено за допомогою методу симплексних решіток, основні склади порошкових сумішей, які дають отримати на поверхні вуглецевої сталі боридні структури підвищеної твердості, фази твердого розчину бору, хрому та алюмінію у Fe_α та прогнозовану глибину поверхневого шару. Встановлені характерні особливості формування мікротвердості поверхневого шару покриттів залежно від складу насичуючої суміші. Встановлений важливий фактор впливу алюмінію на мікротвердість поверхневого шару у багатокомпонентних системах. Його присутність сприяє утворенню твердих розчинів. Отримані нові дані про формування поверхневих шарів при насиченні сталі бором, хромом і алюмінієм і певні умови одержання шарів високої твердості й високої пластичності. Знайдені оптимальні області формування покриттів різної структури та глибини методом симплексного планування. В якості факторів оптимізації були використані відносні площини, зайняті боридами й твердим розчином, а також глибина поверхневих шарів. Наочно показано, як змінюється структура поверхневих шарів залежно від кількісних співвідношень між складовими насичуючих сумішей. Графічні залежності боридної фази, фази твердого розчину й глибини шару від складу насичуючої суміші, при дифузійній металізації (борохромоалітування) дозволяють удосконалювати процес із метою одержання на поверхні вуглецевої сталі покриття з підвищеною зносостійкістю.

Ключові слова: хіміко-термічна обробка, дифузійна металізація, структура, мікротвердість, зносостійкість, боридна фаза

1. Вступ

Процеси комплексного насичення виробів при хіміко-термічній обробці останнім часом знаходять все більше застосування в промисловості, у порівнянні з однокомпонентними процесами [1]. Викликано це тим, що при однокомпонентному насиченні на поверхні металовиробів утворюються структури, які обумовлюють тільки вузький діапазон властивостей у виробі [2]. Проведення комплексного легуючого насичення шляхом послідовного багаторазового однокомпонентного насичення, наприклад бором, а потім хромом та алюмінієм, значно збільшує енерговитрати [3]. При цьому застосування легуваних, високовуглецевих сталей, а також альтернативних багаточиклових процесів хіміко-термічної і наступної тер-

мічної обробки, таких як цементация з наступним гартуванням і відпуском низьковуглецевих сталей, знижує рентабельність виробництва [4].

Відомо, що спільне насичення поверхні металів одночасно бором, хромом і алюмінієм забезпечує можливість одержання на поверхні металовиробів шарів різної твердості, у тому числі високої твердості, яка здатна надавати виробам ріжучі властивості [5]. Така тенденція в науці й промисловості прослідковується у зв'язку з дефіцитом і дорожнечою інструментальних сталей [6]. Звідси випливає, що при поверхневому насиченні вуглецевих сталей є можливість одержувати ріжучий інструмент [7]. Однак для різальних інструментів у багатьох випадках потрібна не тільки поверхнева твердість, але й твердість по перетину інструмента, що виключає деформування ріжучої крайки [8]. Рівень цієї твердості може бути всіляким залежно від типу інструмента й умов його експлуатації [9]. Тому розв'язок проблеми одержання інструментів на базі вуглецевих, конструкційних сталей з нанесеними зносостійкими покриттями вимагає спеціальних досліджень.

Факторами, які ускладнюють рішення поставлених задач, є невизначені типи структур, глибина та твердість поверхневих шарів при дифузійній металізації щодо отримання на конструкційній сталі різної твердості. Відсутня інформація про застосування складу порошкової суміші щодо отримання покриттів на конструкційній сталі з відповідними властивостями. Внаслідок цього ускладнюється одержання якісних дифузійних покриттів на конструкційній сталі.

Тому проблема одержання покриттів заданої структури, глибини і різної твердості на конструкційній сталі при дифузійній металізації є актуальною, яка потребує всебічного дослідження і аналізу.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У роботі [10] зазначено, що серед великої кількості методів нанесення покриттів перспективним є метод одержання дифузійних шарів у порошкових сумішах. Авторами роботи підкреслюється, що достоїнствами методу є простота й доступність застосування, оснащення, що виключає порушення екологічної безпеки навколишнього середовища, а також виключається застосування спеціального устаткування.

На підставі аналізу даних [11] показано, що боровані, хромовані й алітовані покриття мають високі показники зносо-, жаро- і корозійної стійкості відповідно. Але боровані покриття мають низьку пластичність, невисоку жаро- й корозійну стійкість. Хромовані покриття володіють невеликою глибиною й слабкою спорідненістю до основного металу. Алітовані покриття не забезпечують показники зносостійкості. Цей факт обмежує застосування однокомпонентних покриттів у виробництві, особливо якщо мова йде про довговічність деталей машин і різального інструменту в умовах ударно-абразивного зношування.

У роботі [12] експериментально досліджували способи одержання покриттів використовуючи одночасно два компоненти насичуючої суміші. Встановлено, що двокомпонентні покриття розширюють область застосування шарів, наприклад легування хромом боридів знижує крихкість останніх. Однак цього недостатньо, тому що борохромовані покриття мають низьку жаростійкість, що унеможливорює експлуатацію при високих температурах.

У дослідженні [13] з використанням процесу дифузійної металізації вуглецевої сталі показано вплив хрому та алюмінію на властивості поверхневого шару. Доведено, що дифузійний процес хромоалітування забезпечує високі показники окалино- і ерозійної стійкості виробів, що працюють в агресивних середовищах. Однак абразивна зносостійкість залишається низкою.

У роботі [14] досліджували вплив бору та алюмінію при одночасному насиченні поверхні вуглецевої сталі на показники жаростійкості та корозії. Авторами роботи встановлено, що бороалітування забезпечує жаростійкість виробам, однак не захищає вуглецеві сталі від корозії у водяних розчинах солей, лугів і кислот. Тому двокомпонентні покриття знаходять обмежене застосування в промисловості.

За результатами дослідження авторами [15] встановлено, що впровадження до складу порошкової суміші третього компонента дозволить формувати на поверхні виробів шари з необхідними властивостями. Найбільш перспективним є процес комплексного насичення бором, хромом і алюмінієм, коли є можливість до мінімуму скоротити енергетичні витрати на проведення процесу й одержати максимальний ефект від поліпшення якості виробів.

Аналіз літератури дозволив визначити, що відомі результати по борохромоалітуванню недостатньо обґрунтовані теоретично й практично для широкого впровадження в промисловість. Сьогодні неможливо чітко виявити типи структур та глибини поверхневих шарів, які забезпечують високі показники твердості покриття на виробах з конструкційних сталей. Відсутність інформації про застосування складу борохромоалітованої суміші щодо одержання прогнозованого покриття з потрібними властивостями. Відсутність систематично сформованих результатів досліджень стримує застосування в промисловості оптимальних технологій комплексного насичення бором, хромом і алюмінієм. Тому потрібно удосконалити та дослідити особливості процесу дифузійної металізації вуглецевої, конструкційної сталі у порошкових сумішах щодо складу насичуючої суміші для отримання структур і покриттів різної глибини з прогнозованою твердістю поверхневого шару.

3. Мета і завдання дослідження

Мета роботи – виявлення особливостей одержання покриттів на конструкційній сталі щодо отримання прогнозованих структур різної твердості і глибини при борохромоалітуванні.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- виявити типи структур та їх твердість в залежності від складу насичуючої суміші на конструкційній сталі при борохромоалітуванні.
- встановити оптимальні області формування борохромоалітованих покриттів різної структури та глибини в залежності від складу насичуючої суміші

4. Матеріали та методи дослідження щодо отримання покриттів різної твердості на конструкційній сталі при дифузійній металізації

При виборі елементів, які насичують поверхню сталі, виходили з міркування одержання високої твердості поверхневого шару за рахунок фаз на основі

хімічних сполук, що розширює можливості використання покриттів без спеціальної термообробки. Крім того, ураховували той факт, що покриття повинні мати не тільки зносостійкість, але й мати високу корозійну стійкість при роботі з водоемульсійними охолодними рідинами й підвищену стійкість проти окиснення при розігріві ріжучої крайки.

Дослідження проводили відповідно до матриці планування по методу симплексних решіток. Насичуючи компоненти, змінювали в межах 0...25 % V_4C , 0...25 % Cr_3C_2 , 0...25 % Al , 43...68 % Al_2O_3 , при постійному вмісті 7 % $NaCl$ – для активації процесу дифузійної металізації. Нагрівання проводили при температурі 1000 °C 5 год з наступним охолодженням контейнера з піччю (яке тривало 15 годин). Покриття наносили на зразки зі сталі Ст 3, припускаючи надалі можливість виготовлення з неї великих мітчиків для обробки алюмінієвих сплавів.

Структуру шару досліджували за допомогою металографічного мікроскопу МІМ-8 і приладу для вимірювання мікротвердості ПМТ-3. Застосовували хімічне травлення мікрошліфів у 4 % розчині азотної кислоти в етиловому спирті й теплове травлення. За допомогою теплового травлення при нагріванні у печі поверхні мікрошліфа після дифузійної металізації протягом декількох хвилин відбувається кольорове окиснення фаз та основного металу поверхні мікрошліфа.

5. Виявлення типів структур та їх твердість на конструкційній сталі в залежності від складу насичуючої суміші при борохромоалітуванні

Для виявлення основних типів структур, які формуються на поверхні конструкційної сталі, та аналізу їх твердості в залежності від складу насичуючої суміші було проведено низку досліджень процесу борохромоалітування (табл. 1). В процесі дослідження виявлено, що на поверхні конструкційної сталі Ст 3 формуються покриття трьох типів. Перший тип – боридний, характеризується високою твердістю (H_{100} 12870 МПа) після насичення у сумішах, що містять 25 % V_4C або ж містять крім 25 % V_4C карбід хрому (Cr_3C_2) у кількості не більш 12,5 % (табл. 1). При насиченні у суміші №1, 12, 13 боридний поверхневий шар складається із двох зон: перша зона – пориста, світлого кольору, друга зона – щільна, солом'яного кольору (рис. 1). Подібна структура поверхневого шару спостерігається також після насичення у сумішах № 10 і 11 (табл. 1).

Після насичення в суміші №, 2, 3, 6, 7, 8, 25 структура поверхневого шару відповідає структурі боридних й алітованих шарів, одержаних при насиченні в однокомпонентних сумішах, які підтверджуються літературними даними [1].

При насиченні у двокомпонентних сумішах (склади № 3...5, 17, 20, 23) зміна вмісту Cr_3C_2 і порошку Al у зазначених межах (табл. 1) не впливає на структуру поверхневого шару. Вона складається із двох зон: верхньої пухкої й нижньої щільної, що представляє собою твердий розчин хрому й алюмінію в Fe_α (склади № 3...5) або ж бору й алюмінію в Fe_α (склади №17, 20, 23) – це другий тип структури. Можливо припустити, що в присутності алюмінію бор і хром не утворює самостійних фаз, а входить до складу твердого розчину. Зазначений тип покриття відрізняється від першого типу низькими показниками мікротвердості H_{100} 3090...2770 МПа (табл. 1).

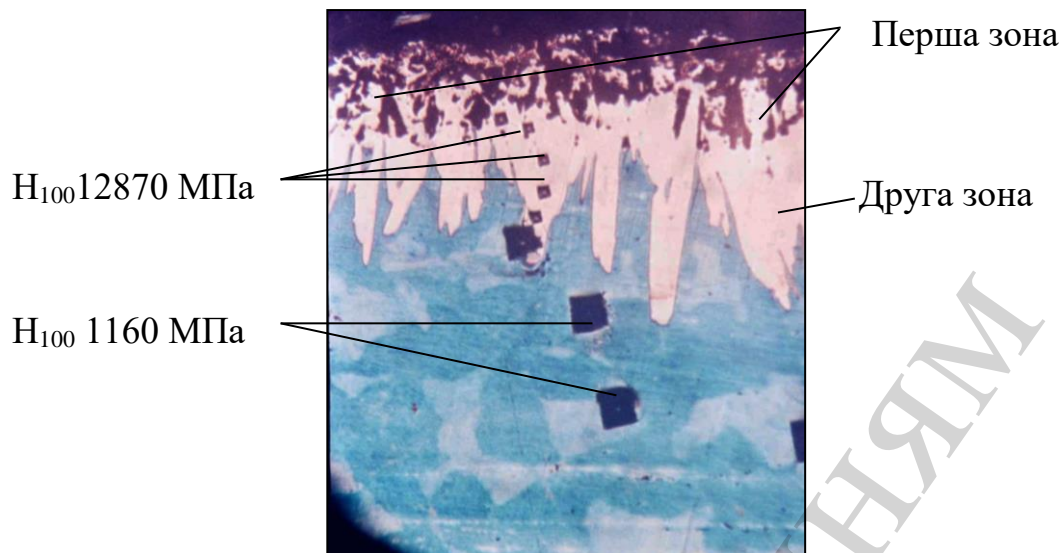


Рис. 1 Мікроструктура поверхневого шару сталі Ст 3 після дифузійної металізації, $\times 100$

Повна відсутність алюмінію (склади № 1, 10, 11) сприяє появі боридів, що мають високу твердість H_{100} 12870 МПа (рис. 1). Причому стабільно високі значення твердості боридів H_{100} 14800...13500 МПа забезпечуються при вмісті Cr_3C_2 не більш 12,5 % (склади № 12, 13).

При більшому вмісті Cr_3C_2 твердість боридів знижується H_{100} 12870...10400 МПа, що можна пояснити розчиненням у них хрому. Скоріш за все при значному вмісті Cr_3C_2 – 25 % (складу № 10), хром, розчиняючись у бориді, утворює твердий розчин заліза, що містить бор і хром (табл. 1). Про це свідчить той факт, що частина боридів, яка не перетворилася у твердий розчин, зберігається у поверхневому шарі в глибині. Твердість таких боридів H_{100} 10400 МПа і розташовуються вони близько до межі з основним металом – це третій тип структури.

В інших досліджених сумішах (склади № 14 – 25) мікротвердість покриття поверхневого шару суттєво не відрізняється H_{100} 3190...2060 МПа і відповідає другому типу структури (твердий розчин). Особливо низкою виявляється мікротвердість поверхневого шару після насичення в сумішах (склади 22, 24, 25), що містять усі три компоненти: B_4C , Cr_3C_2 і порошок Al (табл. 1). Слід зазначити, що Al, який входить до складу порошкової суміші, не сприяє утворенню покриттів високої твердості.

Таким чином, встановлено, що у процесі дифузійної металізації (борохромоалітування), залежно від складу порошкової суміші на поверхні конструкційної сталі, формується шари трьох типів: перший – боридний (боридна фаза) високої твердості; другий – твердий розчин (фаза твердого розчину) низької твердості; третій – бориди, розташовані у твердому розчині змінної твердості.

Таблиця 1

Вплив складу насичуючої суміші на мікротвердість і глибину шару

№ су- міші	Склад суміші, %					Глиби- на ша- ру, мм	Мікротвердість шару H_{100} , МПа			
	V_4C	Cr_3C_2	Al	Al_2O_3	NaCl		1 зона	2 зона	3 зона	(осн. мет.)
1	25	0	0	68	7	0,2	12870	12870	10400	1130
2	0	0	25	68	7	0,45	8500	4210	2540	980
3	0	25	25	43	7	0,3	2900	3090	2290	1050
4	0	18,75	25	49,25	7	0,25	3090	3090	1700	1480
5	0	12,5	25	55,5	7	0,28	2290	3190	1800	1130
6	0	6,25	25	61,75	7	0,25	2770	3500	2150	1130
7	6,25	0	18,75	68	7	0,25	4880	3190	3190	980
8	12,5	0	12,5	68	7	0,2	2730	2730	1870	1000
9	18,75	0	6,25	68	7	0,3	2990	3190	2290	1180
10	25	25	0	43	7	0,1	6700	12870	10400	1560
11	25	18,75	0	49,25	7	0,15	6860	10400	11660	1420
12	25	12,5	0	55,5	7	0,2	13500	13500	11660	1560
13	25	6,25	0	61,75	7	0,2	14800	13000	12870	1560
14	6,25	25	18,75	43	7	0,25	1870	3090	1970	1050
15	12,5	25	12,5	43	7	0,2	2540	3050	2060	980
16	18,75	25	6,25	43	7	0,15	2440	3190	1700	980
17	6,25	18,75	18,75	49,25	7	0,2	2850	3190	1700	1210
18	12,5	18,75	12,5	49,25	7	0,2	2610	3140	1700	1360
19	18,75	18,75	6,25	49,25	7	0,13	2440	3140	1870	1260
20	6,25	12,5	18,75	55,5	7	0,3	2770	2850	2060	1130
21	12,5	12,5	12,5	55,5	7	0,2	2290	3190	2060	1050
22	18,75	12,5	6,25	55,5	7	0,2	2440	2850	1700	1130
23	6,25	6,25	18,75	61,75	7	0,25	3660	2290	1870	1420
24	12,5	6,25	12,5	61,75	7	0,25	2540	2440	2230	1210
25	18,75	6,25	6,25	61,75	7	0,2	2060	2060	2060	1130

6. Встановлення оптимальні області формування борохромоалітованих покриттів різної структури та глибини в залежності від складу насичуючої суміші

Для пошуку оптимальних рішень щодо формування покриттів різної структури і глибини застосовували симплексний метод планування експерименту.

В якості факторів оптимізації були використані відносні площини, зайняті боридами й твердим розчином, а також глибина поверхневих шарів (табл. 2).

В якості моделі використаний поліном четвертої міри. Координати точок плану представлені на рис. 2.

Таблиця 2

Матриця планування симплексного методу

№	Матриця плану			Склад суміші, %					Фактори оптимізації		
	X1	X2	X3	B ₄ C	Al	Cr ₃ C ₂	Al ₂ O ₃	NaCl	боридна фаза, % (рис. 3)	фаза твердого розчину, % (рис.4)	Глибина шару, мм (рис.5)
1	1	0	0	25	0	0	68	7	24,71	0	0,2
2	0	1	0	25	0	25	43	7	5,11	14	0,1
3	0	0	1	0	25	0	68	7	0	49,75	0,45
4	0,5	0,5	0	25	0	12,5	55,5	7	23,74	0	0,2
5	0,5	0	0,5	12,5	12,5	0	68	7	0,2	47,5	0,2
6	0	0,5	0,5	12,5	12,5	12,5	55,5	7	0	38,08	0,2
7	0,75	0,25	0	25	0	6,25	61,75	7	7,92	20,1	0,2
8	0,25	0,75	0	25	0	18,75	49,25	7	4,24	13,1	0,15
9	0,75	0	0,25	18,75	6,25	0	68	7	1,45	36,83	0,3
10	0,25	0	0,75	6,25	18,75	0	68	7	0,15	40,03	0,25
11	0	0,75	0,25	18,75	6,25	18,75	49,25	7	0,18	24,27	0,13
12	0	0,25	0,75	6,25	18,75	6,25	61,75	7	0	39,13	0,25
13	0,5	0,25	0,25	18,75	6,25	6,25	61,75	7	0,73	36,53	0,2
14	0,25	0,5	0,25	18,75	6,25	12,5	55,5	7	1,47	32,63	0,2
15	0,25	0,25	0,5	12,5	12,5	6,25	61,75	7	0,49	36,95	0,25

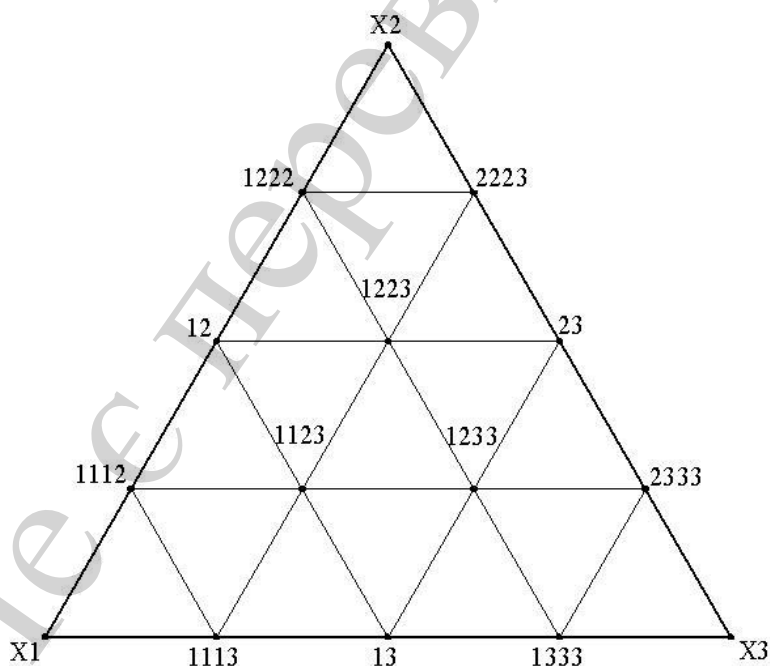


Рис. 2 Симплексна решітка четвертої міри

Рівняння четвертої міри, що зв'язує усі значення факторів з параметрами оптимізації, має вигляд:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \\ + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \delta_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2)^2 + \delta_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3)^2 + \\ + \delta_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3)^2 + \beta_{1123} x_1^2 x_2 x_3 + \beta_{1223} x_1 x_2^2 x_3 + \beta_{1233} x_1 x_2 x_3^2$$

де $\beta_1 = y_1$; $\beta_2 = y_2$; $\beta_3 = y_3$; $\beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2$; $\beta_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3$;
 $\beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3$;

$$\gamma_{12} = \frac{8}{3}(-y_1 + 2y_{1112} - 2y_{1222} + y_2);$$

$$\gamma_{13} = \frac{8}{3}(-y_1 + 2y_{1113} - 2y_{1333} + y_3);$$

$$\gamma_{23} = \frac{8}{3}(-y_2 + 2y_{2223} - 2y_{2333} + y_3);$$

$$\delta_{12} = \frac{8}{3}(-y_1 + 4y_{1112} - 6y_{12} + y_2);$$

$$\delta_{13} = \frac{8}{3}(-y_1 + 4y_{1113} - 6y_{13} + y_3);$$

$$\delta_{23} = \frac{8}{3}(-y_2 + 4y_{2223} - 6y_{23} + y_3);$$

$$\beta_{1123} = 32(3y_{1123} - y_{1223} - y_{1233}) + \frac{8}{3}(6y_1 - y_2 - y_3) - 16(y_{12} + y_{13}) - \\ - \frac{16}{3}(5y_{1112} + 5y_{1113} - 3y_{1222} - 3y_{1333} - y_{2223} - y_{2333});$$

$$\beta_{1223} = 32(3y_{1223} - y_{1123} - y_{1233}) + \frac{8}{3}(6y_2 - y_1 - y_3) - 16(y_{12} + y_{23}) - \\ - \frac{16}{3}(5y_{1222} + 5y_{2223} - 3y_{1112} - 3y_{2333} - y_{2223} - y_{1333});$$

$$\beta_{1233} = 32(3y_{1233} - y_{1123} - y_{1223}) + \frac{8}{3}(6y_3 - y_1 - y_2) - 16(y_{13} + y_{23}) - \\ - \frac{16}{3}(5y_{1333} + 5y_{2333} - 3y_{1113} - 3y_{2223} - y_{1112} - y_{1222}).$$

Графічна залежність боридної фази від складу насичуючої суміші, показана на рис. 3.

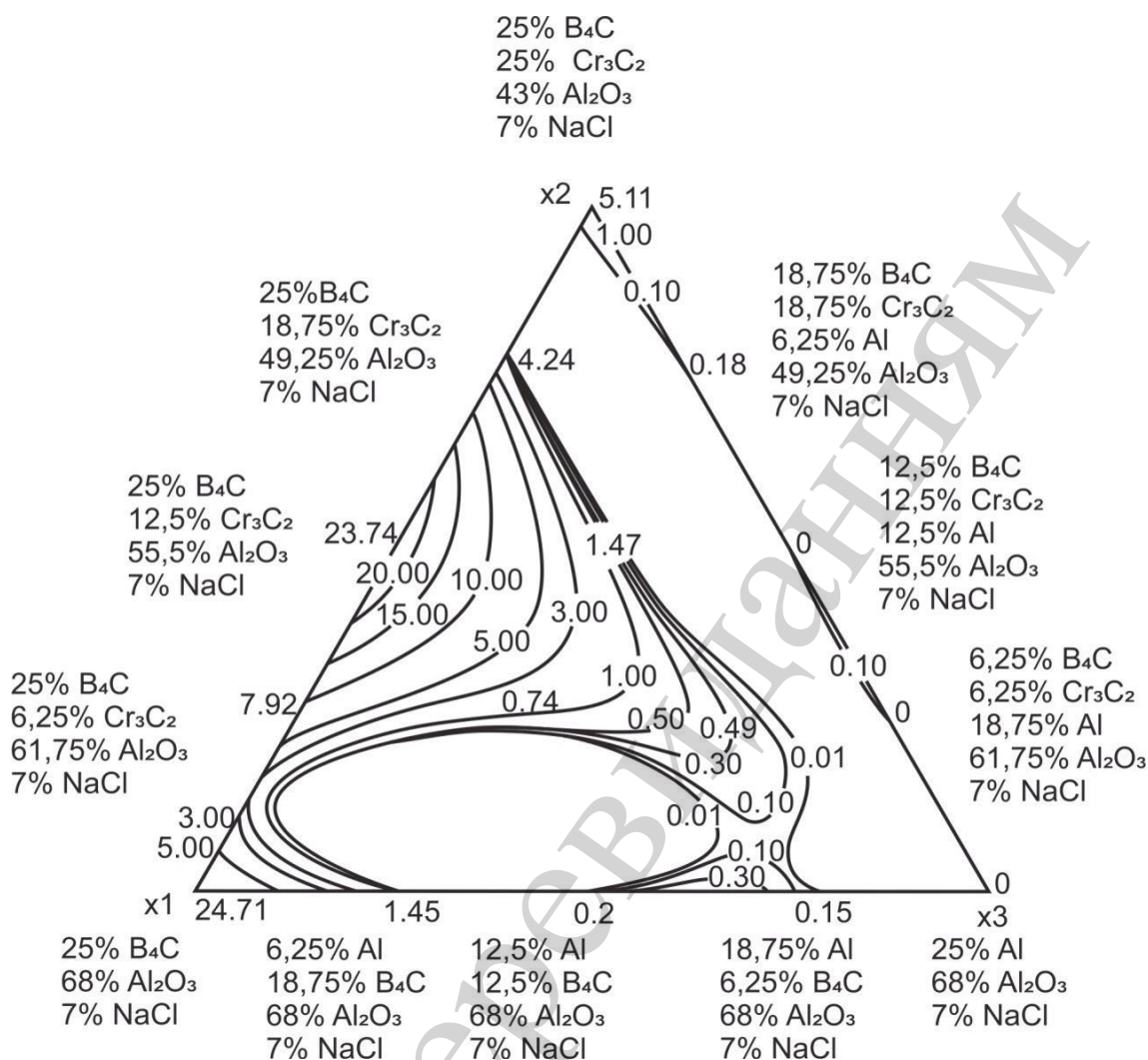


Рис. 3. Закономірності кількісної зміни боридної фази (%) у поверхневому шарі залежно від складу насичуючої суміші при дифузійній металізації (борохромоалітування) (табл. 2)

Згідно з даними табл. 2, найбільша концентрація боридної фази (24,71 і 23,74 %) утворюється на поверхні сталі Ст 3, при насиченні в суміші № 1 і № 4, які складаються з 25 % B₄C, 68 % Al₂O₃, 7% NaCl і 25 % B₄C, 12,5 % Cr₃C₂, 55,5 % Al₂O₃, 7% NaCl відповідно. Найменша кількість боридної фази (0,15 і 0,18 %) утворюється в суміші № 10 і № 11, складу 6,25 % B₄C, 18,75 % Cr₃C₂, 68 % Al₂O₃, 7 % NaCl і 18,75 % B₄C, 6,25 % Al, 18,75 % Cr₃C₂, 49,25 % Al₂O₃, 7 % NaCl відповідно (табл. 2). Зменшення в суміші постачальника бору й збільшення постачальника алюмінію й хрому забезпечує відсутність боридов у поверхневому шарі (суміш № 3, 6, 12, табл. 2).

Графічна залежність фази твердого розчину від складу насичуючої суміші, наведена на рис 4.

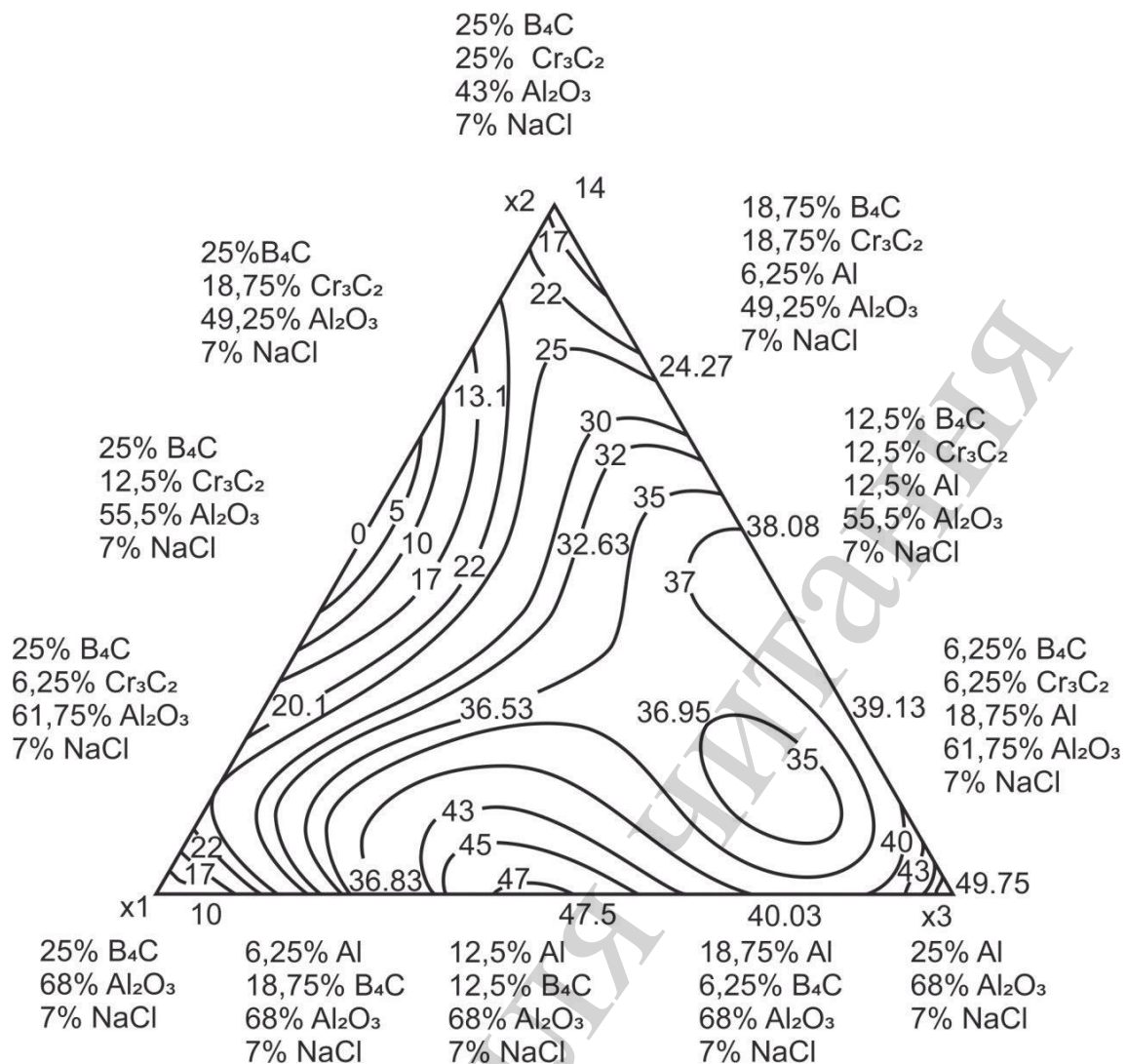


Рис. 4. Закономірності кількісної зміни фази твердого розчину (%) у поверхневому шарі залежно від складу насичуючої суміші, при дифузійній металізації (борохромоалітування) (табл. 2)

Найбільша кількість твердого розчину (49,75 і 47,5 %) утворюється при насиченні у суміші №3 і №5, які складаються з 25 % Al, 68 % Al₂O₃, 7 % NaCl, і 12,5 % B₄C, 12,5 % Al, 68 % Al₂O₃, 7 % NaCl відповідно. Найменша кількість фази твердого розчину відповідає складу сумішей №1 і №4 (табл. 2), у яких алюміній відсутній, а також у суміші № 8, де концентрація хрому змінюється в межах від 0 до 18,75 % при постійній кількості B₄C 25 %. Зменшення концентрації хрому, у насичуючої суміші №1 від 6,25 до 0 % при постійній кількості 25 % B₄C призводить до зникнення твердого розчину й появи боридів (табл. 2).

Найбільша глибина поверхневого шару (0,45 мм), утворюється при насиченні у суміші №3 (табл.2), у якій алюміній має найбільш високу концентрацію – 25 % (рис. 5).

Зменшення кількості алюмінію від 25 % до 6,25 % і збільшення бору від 0 до 18,75 %, знижує глибину поверхневого шару, яка становить 0,3 мм (суміш №9 табл. 2). При насиченні у порошкових сумішах № 12 і № 15 із складу 6,25 % B₄C, 6,25 % Cr₃C₂, 18,75 % Al, 61,75 % Al₂O₃, 7 % NaCl і 12,5 % B₄C, 6,25 % Cr₃C₂,

12,5 % Al, 61,75 % Al₂O₃, 7 % NaCl відповідно на зразках зі сталі Ст 3 утворюється дифузійний шар глибиною 0,25 мм. Найменша глибина шару (0,1 мм) утворюється на поверхні сталі при насиченні у порошковій суміші № 2, складу: 25 % B₄C, 25 % Cr₃C₂, 43 % Al₂O₃ (табл. 2).

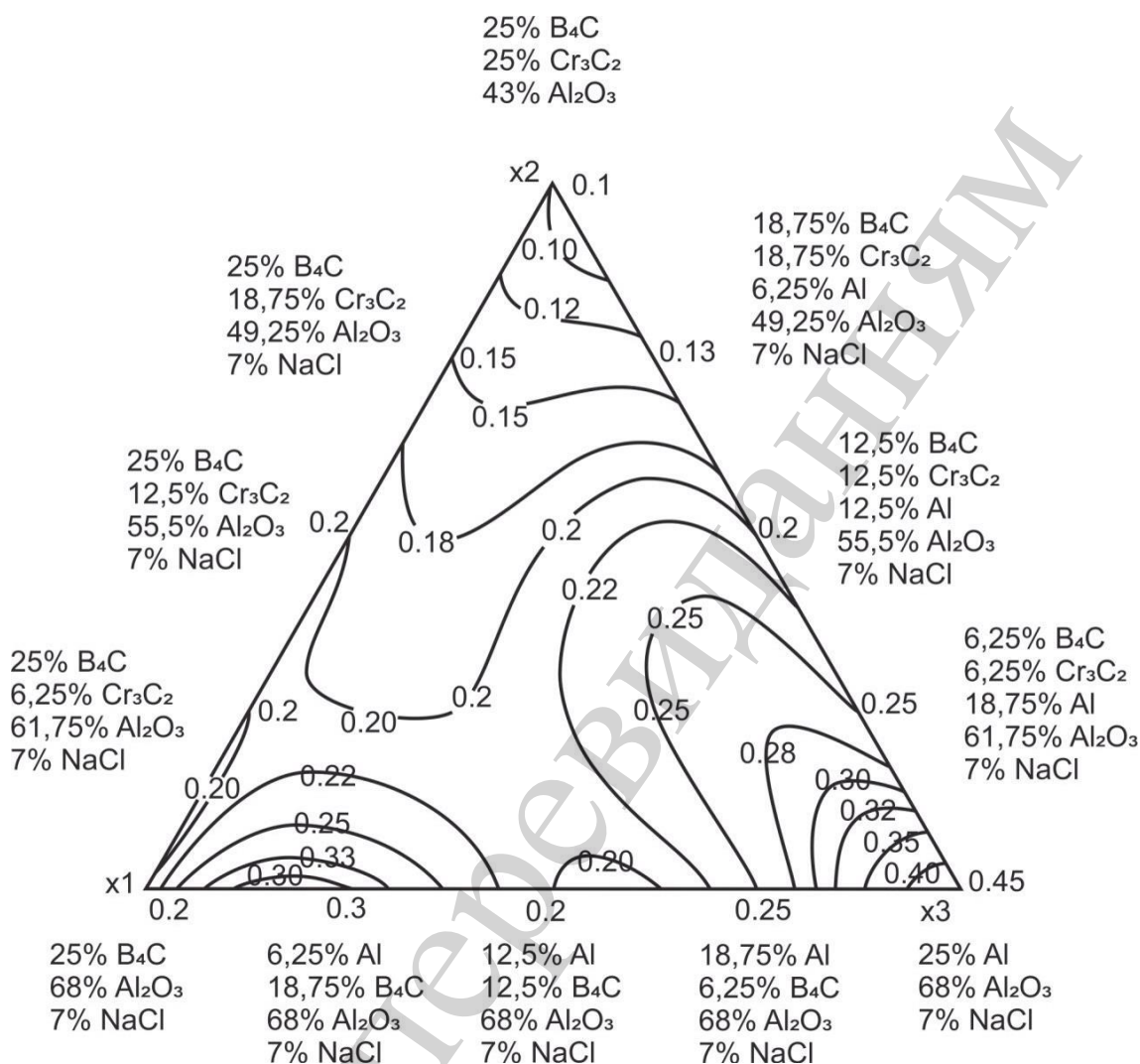


Рис. 5. Закономірності зміни глибини (мм) поверхневого шару залежно від складу насичуючої суміші при дифузійній металізації (борохромоалітування) (табл. 2)

7. Обговорення результатів отримання покриттів різної твердості на конструкційній сталі при дифузійній металізації

Проведено дослідження покриттів різної твердості на конструкційній сталі при насиченні у порошкових сумішах при дифузійній металізації. Одержані результати дозволили визначити вплив складу насичуючих сумішей на структуроутворення, глибину, твердість та зносостійкість поверхневих шарів при дифузійній металізації вуглецевої, конструкційної сталі Ст 3:

- комплексне насичення одночасно трьома компонентами в контейнері з плавким затвором забезпечує суттєву економію часу. Раніше насичення прово-

дили послідовно спочатку двома, а потім одним компонентом. Це потребувало значного часу процесу та збільшення енерговитрат;

- спосіб насичення сталі у порошкових сумішах відрізняється від інших способів дифузійної металізації простотою реалізації процесу без використання спеціального, коштовного устаткування. Інший спосіб дифузійної металізації потребує використання токів промислової частоти, газових або інших шкідливих та небезпечних середовищ;

- борохромоалітування вуглецевої сталі надає можливість одержувати покриття з різною твердістю поверхні. В залежності від складу порошкової суміші за допомогою симплексного методу на поверхні сталі отримуються покриття твердого розчину з твердістю H_{100} 2500...3500 МПа (табл. 1) і боридні покриття із твердістю H_{100} 12000 – 14000 МПа (рис. 1);

- вивчено закономірності зміни структури, глибини і твердості поверхневих шарів залежно від складу насичуючої суміші (табл. 1). Побудовано графічні залежності боридної фази (рис. 3), фази твердого розчину (рис. 4) та глибини шару (рис. 5) від складу насичуючої суміші (табл. 2). Раніше неможливо було отримати на поверхні борохромоалітованої сталі покриття потрібної структури та глибини. Побудування графічних залежностей дозволило отримувати прогнозовані покриття на конструкційній сталі;

До обмежень комплексного насичення конструкційної сталі при дифузійній металізації слід віднести наведені нижче.

- Ретельне підготування компонентів насичуючої суміші та унеможливити потрапляння в процесі дифузійної металізації кисню під плавкий затвор і запобігти спіканню порошкової суміші. Для цього треба точніше вимірювати кількість порошкової суміші з урахуванням об'єму досліджуваних зразків або металовиробів у цієї суміші.

- Обмеження процесу борохромоалітування у порошкових сумішах в контейнері з плавким затвором за габаритами металовиробу. Для вирішення проблеми насичення поверхні габаритних деталей одночасно бором, хромом і алюмінієм, таких як, неможливість виготовлення великих контейнерів та використання недешевого нагрівального устаткування, можливо запропонувати процес дифузійної металізації за допомогою паст або обмазок на основі бору, хрому та алюмінію.

- Використання зносостійких покриттів отриманих після борохромоалітування у порошкових сумішах на конструкційній сталі доцільно в умовах абразивного тертя. При ударно-абразивному терті покриття, які мають високу твердість і низьку пластичність будуть руйнуватися та зменшувати показники зносостійкості.

У роботі досліджено борохромоалітовані покриття на конструкційній сталі Ст 3 з використанням процесу дифузійної металізації у порошкових сумішах. Компоненти порошкової суміші змінювались у відповідності з матрицею планування симплексного методу. Не змінними залишились активатор (NaCl – 7 %) і температура процесу (1000 °C). Тому не вирішеними питаннями залишаються визначення впливу температури та використання інших активаторів насичуючої порошкової суміші на формування покриттів при борохромоалітуванні.

У роботі використано вуглецеву конструкційну сталь Ст 3, яка відноситься до низьковуглецевої групи сталей. Використання сталей середньовуглецевих та низьколегованих можуть дати подальший розвиток дослідженню.

Для пошуку оптимальних рішень з використанням кількісного металографічного аналізу структурних складових для отримання достовірних результатів дослідження необхідно дотримуватись якісної поверхні мікрошліфів та чіткого зображення мікроструктури сталевих зразків.

8. Висновки

1. Процес дифузійної металізації (борохромоалітування), залежно від концентрації елементів у складі сумішей, формує на поверхні вуглецевої сталі шари трьох типів: перший – боридний (боридна фаза); другий – твердий розчин (фаза твердого розчину); третій – бориди, розташовані у твердому розчині. Кожен шар має особливі властивості, які при експлуатації борохромоалітованих виробів будуть відповідати певним вимогам.

Встановлений важливий фактор впливу алюмінію на мікротвердість поверхневого шару при борохромоалітуванні. Підвищення концентрації алюмінію від 18,7 % до 25 %, який входить до складу насичуючої суміші при борохромоалітуванні, сприяє збільшенню глибини поверхневого шару й утворенню фази твердого розчину. Зменшення концентрації алюмінію від 25 % до 6,2 % у борохромоалітованих сумішах сприяє утворенню боридів високої твердості легованих хромом.

2. Графічні залежності боридної фази, фази твердого розчину й глибини шару від складу насичуючої суміші, при дифузійній металізації (борохромоалітування), дозволяють удосконалювати процес із метою одержання на поверхні вуглецевої сталі покриття із прогнозованою структурою, глибиною і твердістю.

Література

1. Karunanayake, G., Ng, Y.-L., Knowles, J. C., Delgado, A. H. S., Young, A. M., Gulabivala, K., Nazhat, S. N. (2019). The effect of NaOCl and heat treatment on static and dynamic mechanical properties and chemical changes of dentine. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 97, 330–338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.05.042>
2. Chien, Y.-C., Yang, T.-C., Hung, K.-C., Li, C.-C., Xu, J.-W., Wu, J.-H. (2018). Effects of heat treatment on the chemical compositions and thermal decomposition kinetics of Japanese cedar and beech wood. *Polymer Degradation and Stability*, 158, 220–227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.11.003>
3. Bhowmik, R. N., Venkata Siva, K., Reddy, V. R., Sinha, A. K. (2019). Study of the lattice structure and magnetic spin order modification in chemical routed α -Fe_{1.4}Cr_{0.6}O₃ oxide as an effect of heat treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 484, 42–54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.126>
4. Markov, O., Zlygoriev, V., Gerasimenko, O., Hrudkina, N., Shevtsov, S. (2018). Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (95)), 16–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>

5. Карпов, Л. П. (2003). Применение двойной химико-термической обработки при изготовлении режущего инструмента из конструкционных сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1, 7–8.
6. Markov, O., Gerasimenko, O., Aliieva, L., Shapoval, A. (2019). Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 52–60. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00877>
7. Степанов, М. С. (2007). Структура и фазовый состав поверхностного слоя легированных порошковых сталей при низкотемпературном диффузионном насыщении азотом и углеродом. *Вестник Донского государственного технического университета*, 7 (1), 39–46.
8. Markov, O. E., Perig, A. V., Zlygoriev, V. N., Markova, M. A., Kosilov, M. S. (2017). Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39 (11), 4649–4665. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0812-y>
9. Дьяченко, Ю. Г. (2014). Исследование износостойкого поверхностного слоя углеродистой стали У7 полученного при химико-термической обработке. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, 1, 71–74.
10. Kang, Y., Guo, F., Li, M. (2019). Effect of chemical composition and heat treatment on microstructure and mechanical properties of Nb-xTi-16Si-3Cr-3Al-2Hf-yZr alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 760, 118–124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.117>
11. Liu, X. Y., Yi, H., Che, J. W., Liang, G. Y. (2019). Phase, compositional, structural, and chemical stability of La₂Ce₂O₇ after high temperature heat treatment. *Ceramics International*, 45 (4), 5030–5035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.204>
12. Pettinari-Sturmel, F., Vultros, W., Hantcherli, M., Warot-Fonrose, B., Marcelot, C., Douin, J. et. al. (2019). Creep behavior in the new AD730TM nickel-based disk superalloy – Influence of aging heat treatment and local chemical fluctuations. *Materials Science and Engineering: A*, 754, 9–17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.088>
13. Chung, J., Kwak, S.-Y. (2018). Solvent-assisted heat treatment for enhanced chemical stability and mechanical strength of meta-aramid nanofibers. *European Polymer Journal*, 107, 46–53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.07.051>
14. Liu, X., Zhao, G., Lei, L., Jia, J. (2018). The effect of heat treatment temperature on superconductivity of Bi-2212/YBCO heteroepitaxial structure fabricated by chemical solution deposition approach. *Ceramics International*, 44 (9), 10820–10823. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.126>
15. Bruton, T. A., Sedlak, D. L. (2018). Treatment of perfluoroalkyl acids by heat-activated persulfate under conditions representative of in situ chemical oxidation. *Chemosphere*, 206, 457–464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.128>