

УДК 669.018.44 : 669.054.8

О. А. Глотка, д-р техн. наук А. Д. Коваль, д-р техн. наук Ю. Н. Внуков

Національний технічний університет, м. Запоріжжя

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛЕГУВАННЯ ВАЖКОТОПКИМ БРУХТОМ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ

Розглянуто вплив важкотопкого брухту, що містить вольфрам, на мікроструктуру та властивості жароміцного нікелевого стопу ЗМІ-ЗУ (ХН64ВМКЮТЛ) до та після довготривалої теплової дії. Встановлено, що структура та властивості майже не відрізняються від базового стопу.

Ключові слова: жароміцний стоп, важкотопкий брухт, структура, властивості, розподіл легувальних елементів.

Розвиток газотурбобудування направлено по шляху зростання навантаження деталей турбін та одночасним збільшенням вимог до надійності, ресурсу роботи та економічності газотурбінних двигунів. Надійність та довготривалість роботи значно залежать від експлуатаційної довговічності окремих елементів, з яких найбільш відповідальними є деталі гарячого тракту турбіни, які виготовляються точним литвом [1].

Експлуатаційна довготривалість литих лопаток значною мірою залежить від стабільності структури і фізико-механічних властивостей жароміцних нікелевих стопів.

Покращення економічності виготовлення стопів можливо за рахунок удосконалення технологій виробництва, а саме за рахунок використання економічного легування та розробки удосконалених технологій режиму термічної обробки.

Зниження витрат на основні легувальні елементи можливе через пошук матеріалів, які можуть замінити основні легувальні елементи, при збереженні сприятливої структури та властивостей стопу.

Одним із коштовних матеріалів, які вводять до жароміцних стопів, є вольфрам. Він підвищує характеристики жароміцності і розміщується в твердому розчині та в карбідах типу $M_{23}C_6$, а іноді спостерігається і в карбідах типу MC. Масова частка вольфраму в жароміцних стопах коливається від 5 до 10 %, що викликає погіршення характеристик жаростійкості [2].

У роботі представлені результати дослідження впливу легування важкотопким брухтом, що в своєму складі містить приблизно 90 % вольфраму [3], на структуру і властивості жароміцного корозійностійкого нікелевого стопу ЗМІ-ЗУ (ХН64ВМКЮТЛ) до та після довготривалої теплової обробки.

Матеріал та методика досліджень

У роботі використано стоп ЗМІ-ЗУ, в якому замість вольфраму додавалася лігатура Ni-W [4], що виплавлялася з використанням важкотопкого брухту, що містить вольфрам. Топлення проводили в індукційній вакуумній печі УППФ-3М з залишковим тиском 0,266 Па при температурі 1600 °С. Заливання металу проводили при температурі 1550 °С в керамічні форми, нагріті до 900 °С (зразки діаметром 12 мм та довжиною 60 мм). Хімічний склад експериментального стопу (ЗМІ-ЗУ^Е) та згідно з ТУ 481.981.6.00009 наведено в таблиці 1.

Отримані відливки підлягали термічній обробці за режимом: нагрівання 1180±10 °С, витримка 4 години, охолодження на повітрі; нагрівання 1050±10 °С, витримка 3 години, охолодження на повітрі; старіння при 850±10 °С, 24 години, охолодження на повітрі.

З відливок виготовлялися зразки для визначення механічних та жароміцних властивостей, а також дослідження мікроструктури. Визначення механічних властивостей виконували згідно з вимогами ГОСТ 1497-84

Таблиця 1 – Хімічний склад експериментального (ЗМІ-ЗУ^Е) та згідно з ТУ481.981.6.00009

Масова частка елементів, %							
Марка сплаву	Al	Ti	W	Mo	Cr	Co	Ni
ЗМІ-ЗУ ^Е	4,0	4,5	6,5	0,9	12,55	5,05	основа
ТУ481.981.6.00009	2,8–4,0	4,0–5,5	6,5–8,5	0,5–1,25	12,5–14,0	4,0–6,0	основа

(тип зразка II, $d_0 = 5$ мм, $l_0 = 25$ мм) і ГОСТ 9651-84 (тип зразка IV, $d_0 = 5$ мм, $l_0 = 25$ мм). Довготривалу міцність визначали згідно з ГОСТ 10145-81 зразки доводили до руйнування при температурі 800 °С на машинах ВПК-11.

Мікроструктуру вивчали на електронних мікроскопі JSM 6360, який оснащений системою рентгено-спектрального енергодисперсійного мікроаналізу при прискорювальній напрузі від 15 до 30 кВ та силі струму зонда від 4 нА до 30 нА у вторинних та відбитих електронах. Характеристичні випромінювання отримані від сканування по площині шліфа (методом картування) та від характерних точок; кількісний мікрорентгеноспектральний аналіз виконаний при порівнянні отриманих спектрограм з еталонами. Зразки перед випробуванням механічно шліфували, полірували та хімічно травили в реактиві «Марбл» (100 мл HCl, 20 гр CuSO₄, 100 мл H₂O).

Результати дослідження та їх обговорення

Дослідження відбуваються у вигляді порівняння властивостей експериментального сплаву ЗМІ-3У^Е, виплавленого з використанням важкотопкого брухту, з базовим стопом ЗМІ-3У, виплавленим згідно з ТУ 481.981.6.00009.

Металографічні дослідження в діапазоні збільшення до $\times 100$ дають змогу розглянути макроструктуру, насамперед форму та міждендритні відстані до проведення повного комплексу термічної обробки. Ріст дендритів відбувається від поверхні виливка до центру, що обумовлено тепловідводом від виливниці. Структура стопів однорідна без суттєвих неметалевих вкраплень та типова для ливарних матеріалів цієї групи. Міждендритна відстань (між сусідніми осями першого порядку) приблизно однакова і становить 0,048–0,081 та 0,065–0,113 мм для експериментального та базового стопів відповідно. Таким чином, важкотопкий брухт мало впливає на розмір та форму дендритів.

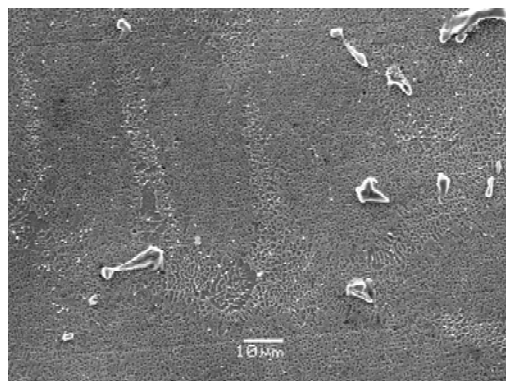
Мікроструктура після термічної обробки експериментального та базового стопу наведена на рис. 1.

Структура стопу, згідно з паспортом на стоп ЗМІ-3У [5], складається з γ - твердого розчину на основі нікелю, інтерметаліду γ' , який залежно від хімічного складу може змінювати співвідношення елементів, та карбідів типу MC і M₂₃C₆. Морфологія виділень карбідів типу MC зазвичай має форму грубих неправильних включень або ієрогліфів. Ці карбіди первинні і мають стійку структуру та повністю не розчиняються під час термічної обробки. В стопах цієї групи спостерігаються карбіди типу MC таких елементів, як Ti, Nb та Ta. Очевидно, що атоми цих металів можуть замінити одне одного в карбіді та утворювати сполуки типу (Ti, Nb) C. Однак атоми менш схильних до утворення з вуглецем сполук також можуть займати місце у складі карбідних фаз. Таке явище може приводити до виродження стабільного карбіду з проходженням реакції та утворенням менш стійкого карбіду типу M₂₃C₆.

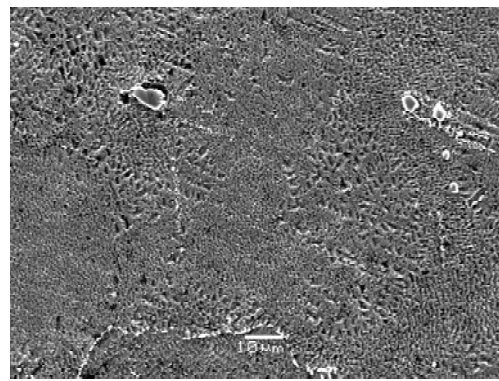
Карбіди типу M₂₃C₆ проявляють помітну схильність до виділення по границях зерен у вигляді округлої форми або у вигляді пластин. У стопі наявний вольфрам та молібден, звідси карбіди можуть набирати вигляд у Cr₂₃(W,Mo)₂C₆. Хоча хром у сполуці може замінюватися нікелем, кобальтом або навіть залізом, а вольфрам з молібденом – іншими наявними тугоплавкими металами. Саме ці карбіди перешкоджають зерномежовому проковзуванню при високотемпературній повзучості та мають найбільшу спорідненість з т.щ.п. фазами. Це може призводити до зародження на карбіді т.щ.п. фази, яка буде суттєво знижувати властивості сплаву. Т.щ.п. фази найчастіше розміщуються по границях зерен та мають пластинчасту форму. Однак на експериментальному та базовому стопах вказана фаза не спостерігається.

Після випробування на довготривалу міцність при температурі 800 °С металографія стопу значно змінюється, спостерігається збільшення в розмірах та витягування структурних складових (рис. 2).

Така структура типова для стопів, які пройшли довготривалу випробування або експлуатацію. Однак ти-



а



б

Рис. 1. Мікроструктура після термічної обробки базового (а) та експериментального (б) сплаву, $\times 1000$

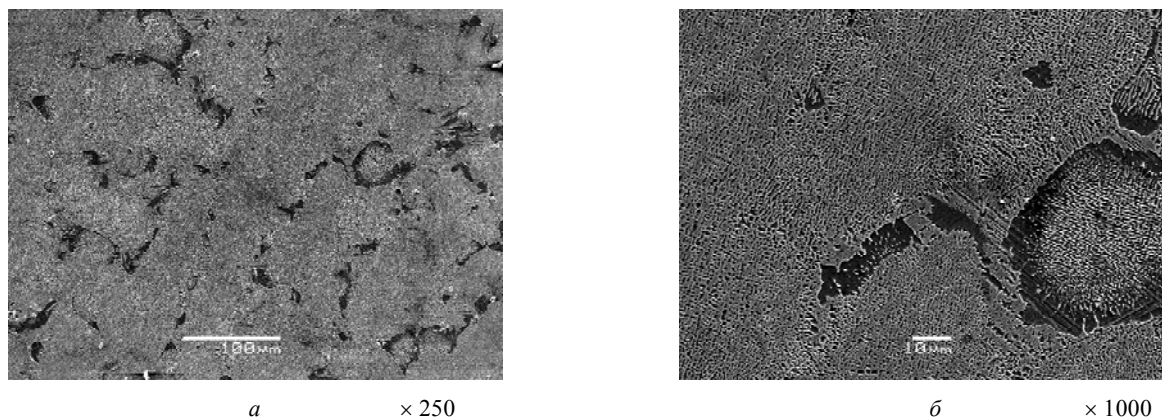


Рис. 2. Мікроструктура експериментального сплаву ЗМІ-3У після випробування на довготривалу міцність (800 °С)

повим є також виділення пластин σ - фази, яка значно знижує характеристики стопу, але таких включень не спостерігається в експериментальному стопі. Спостерігається проходження явищ зі збільшення розміру (коагуляції) та коалесценції γ' - фази, такі самі процеси відбуваються і з карбідами. Коалесценція γ' - фази проявляється утворенням на поверхні досліджуваного шліфа характерної стрічкової структури («рафт-структура»), яка має перпендикулярну орієнтацію до прикладеного навантаження. Така морфологія призводить до зниження опору руху дислокацій при високотемпературній повзучості.

Механічні властивості досліджували при кімнатних температурах та температурах близьких до експлуатаційних (800 °С) випробуванням на розтяг, а також високотемпературні довготривалі (довготривалу міцність) з навантаженням 410 МПа (табл. 2). Порівняння отриманих властивостей від експериментального стопу з технічними умовами та паспортом на сплав показало, що характеристики міцності і пластичності при кімнатній температурі та 800 °С відповідають висунутим вимогам.

Довготривалі випробування дають змогу одержати результати, які максимально наближені до умов експлуатації стопу. Середнє значення отриманих результатів випробування при напруженні 410 МПа становить 476 ± 52 годин, що дає змогу стверджувати про проходження зразком усіх стадій повзучості і кінцевої стадії – руйнування. Такі випробування чутливі до наявності шкідливих домішок (таких як залізо, сірка, фосфор, свинець та вісмут), оскільки вони призводять до утворення легкоплавких з'єднань та пришвидчення явища окислення. Після випробування зразок мав рівномірний наліт окислів темного кольору без розшарувань.

Дослідження розподілу легувальних елементів проводилося з метою визначення та ідентифікації фаз на поверхні шліфа. Також важливим завданням було визначити місце знаходження вольфраму у фазах та вплив вольфраму на структуроутворення та рівномірність розподілу.

Розподіл нікелю по всій поверхні зразків рівномірний (рис. 4–6), окрім областей, де розташовуються карбідні вкраплення. Такий же характер розподілу спостерігається і для алюмінію. Титан розміщується

Таблиця 2 – Механічні та високотемпературні властивості експериментального сплаву (ЗМІ-3У^Е) в порівнянні з паспортними даними і технічними умовами постачання

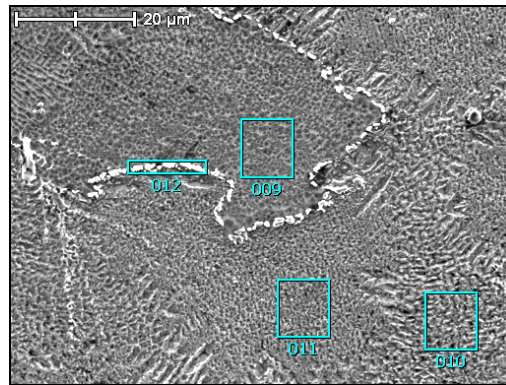
Джерело даних	Механічні властивості при 20 °С				Механічні властивості при 800 °С				Довготривала міцність, МПа ($t = 800$ °С)	
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	σ , МПа	τ , годин
ЗМІ-3У ^Е	973,3 $\pm 34,2$	845,3 $\pm 85,7$	8,43 $\pm 0,71$	14,26 $\pm 1,14$	894,3 ± 54	865,3 ± 38	11 $\pm 1,1$	17,23 $\pm 1,5$	410	476 \pm 52
ТУ 108.1119-82	≥ 800	≥ 700	≥ 3	–	≥ 880	≥ 680	≥ 4	–	410	≥ 100
ТУ 481.981.6.00009	≥ 834	≥ 716	≥ 3	–	≥ 784	≥ 686	≥ 3	–	–	–
Паспорт на стоп ЗМІ-3У [5]	≥ 834	≥ 716	≥ 3	$\geq 5,91$	≥ 833	≥ 686	≥ 4	$\geq 6,84$	410	490 \pm 34

майже рівномірно по всьому об'єму, окрім областей з первинними карбідами типу МС, до яких він входить і які розміщуються в товщі зерна.

Окрім Ті, до первинних карбідів входять вольфрам та молібден, що знижує стійкість карбідів, і це може призвести до карбідних реакцій у процесі високотемпературної експлуатації, які призведуть до утворення менш стійких карбідів типу $M_{23}C_6$.

Хром розміщується не тільки у твердому розчині, а й на границі зерна у вигляді карбіду типу $M_{23}C_6$, який утворюється в процесі термообробки і стійкий до температури 1050 °С. Такий розподіл карбідів веде до зміцнення границі зерна та зниження зерномежової повзучості.

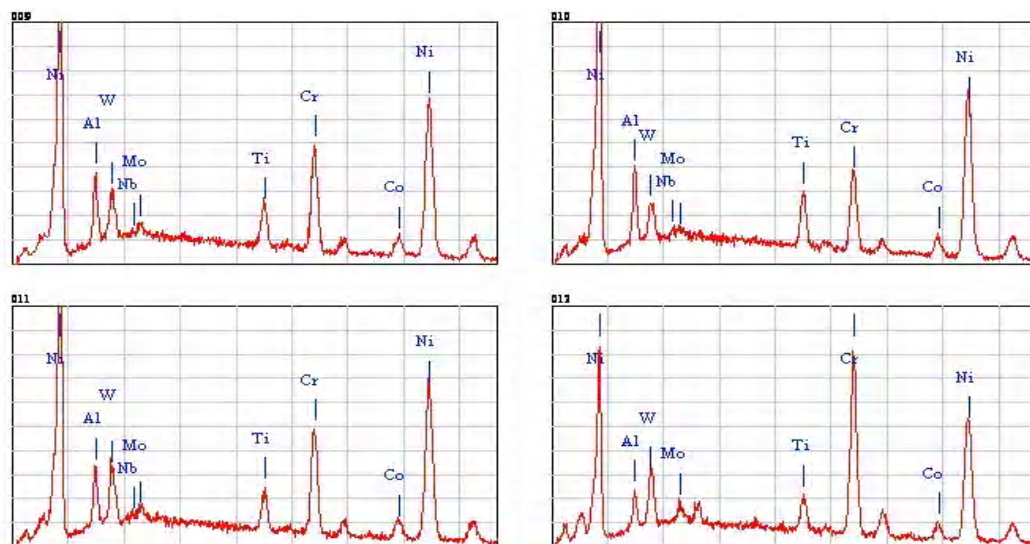
Утворення топологічно щільно пакованих фаз не спостерігається як після термічної обробки, так і після довготривалих випробувань.



а × 1500

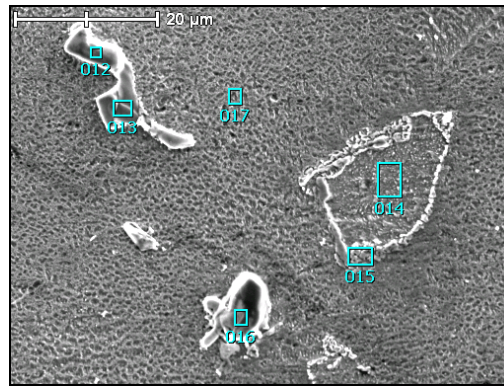
№ точки	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W	Всього, %
009	2,98	4,62	15,55	6,17	64,82	1,63	4,23	100
010	3,57	5,71	12,51	6,53	68,09	0,76	2,83	100
011	2,76	4,02	16,66	6,37	64,11	1,70	4,37	100
012	1,69	3,43	29,92	5,65	52,15	2,13	5,03	100

б



в

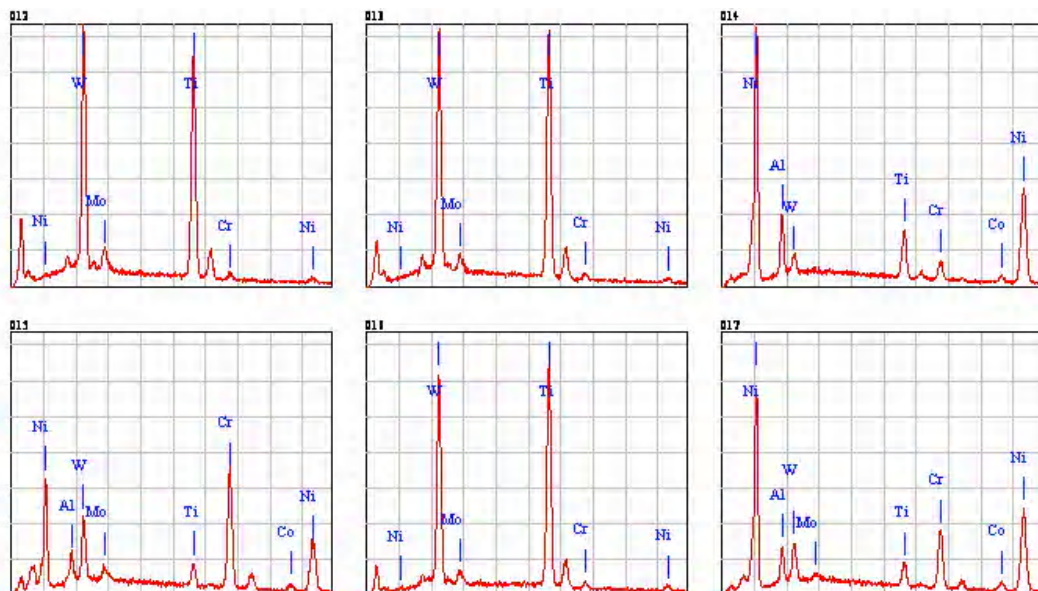
Рис. 4. Мікроструктура експериментального сплаву з відміченими місцями аналізу (а), спектрограми від місць, що аналізуються (в), приблизний хімічний склад місць, що аналізуються (б)



a × 1800

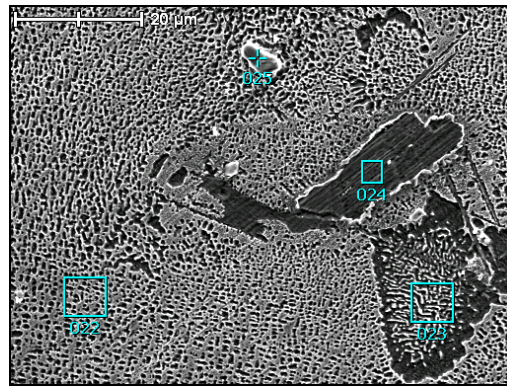
№ точки	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W	Всього, %
012	0	50,67	2,25	0	3,69	5,47	37,91	100
013	0	54,91	1,84	0	3,38	3,75	36,12	100
014	5,28	10,02	5,60	4,19	71,84	0	3,06	100
015	2,10	4,34	36,16	3,81	40,69	2,66	10,24	100
016	0	55,13	2,50	0	4,13	3,09	35,15	100
017	3,10	4,84	17,73	5,47	61,44	0,94	6,48	100

б



б

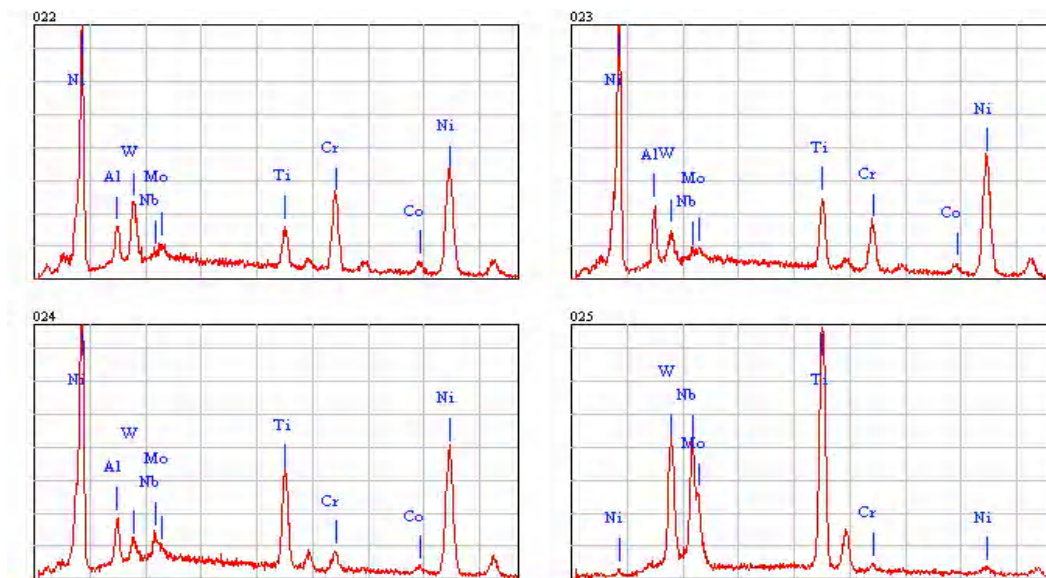
Рис. 5. Мікροструктура базового стопу з відміченими місцями аналізу (а), спектрограми від місць, що аналізуються (б), приблизний хімічний склад місць, що аналізуються (б)



a × 1600

№ точки	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W	Всього, %
022	2,37	5,34	17,27	5,3	61,1	1,55	7,06	100
023	3,24	9,98	10,64	4,02	68,7	1,15	3,07	100
024	2,55	14,06	3,84	3,01	73,98	0,67	1,89	100
025	0	60,61	1,93	0	8,50	6,70	22,26	100

б



в

Рис. 6. Мікροструктура експериментального стопу після випробування на довготривалу міцність з відміченими місцями аналізу (*a*), спектрограми від місць, що аналізуються (*в*), приблизний хімічний склад місць, що аналізуються (*б*)

Висновки

1. Досліджено структуру та властивості жароміцного корозійностійкого нікелевого стопу ЗМІ-3У до та після довготривалої теплової дії.

2. Встановлено, що структура до та після термічної обробки майже не відрізняється від базового стопу, спостерігається наявність фаз, які характерні для ливарного стопу на нікелевій основі.

3. Після випробування на довготривалу міцність встановлено, що т.щ.п. фази не виділяються, а спостерігаються явища коагуляції та коалесценції γ' - фази та утворення рафт-структури.

4. Механічні властивості експериментального стопу знаходяться в межах указаних у технічних вимогах та паспорті на стоп ЗМІ-3У.

Таким чином, можна стверджувати, що експери-

ментальний стоп відповідає вимогам ТУ 108.1119-82, ТУ 481.981.6.00009 та паспорту на стоп ЗМІ-3У і може бути використаний, як більш дешевий заміник базового стопу, за рахунок зниження коштовності легувального елемента (вольфраму), що веде до зниження собівартості.

Перелік посилань

1. Суперсплавы II : Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок : в 2 кн. / [под. ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля] ; пер. з англ. Р. В. Шалин. – М. : Metallurgiya, 1995. – Кн. 1. – 1995. – 384 с.
2. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия) / Е. Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
3. Глотка О. А. Дослідження важкотопкого брукхту, що містить вольфрам / О.А.Глотка, А. Д. Коваль, Л. П. Степанова // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – № 1. – С. 17–20.
4. Глотка О. А. Виготовлення Ni-W лігатури для легування стопів на основі нікелю / О. А. Глотка, А. Д. Коваль // Вісник двигунобудування. – 2008. – № 1. – С. 139–142.
5. Паспорт на сплав ЗМІ-3У [директор по НР Гамов Н. С., научный руководитель работ Коваль А. Д., ответственный исполнитель работ Андриенко А. Г.]. – Запорожье : Запорожский государственный технический университет, 1995. – 46 с.

Одержано 26.01.2010

O. A. Glotka, A. D. Koval, Yu. N. Vnukov

RESEARCH OF INFLUENCE OF REFRACTORY CROW-BAR ALLOYING ON A STRUCTURE AND PROPERTIES OF NICKEL SUPERALLOY

Рассмотрено влияние тугоплавкого лома, который содержит вольфрам, на микроструктуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЗМІ-3У (ХН64ВМКЮТЛ) до и после длительного теплового воздействия. Установлено, что структура и свойства почти не отличаются от базового сплава.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, тугоплавкий лом, структура, свойства, распределение легирующих элементов.

The influence of refractory crow-bar which contains tungsten on microstructure and properties of nickel-base superalloy ZMI-3U (XN64VMKYUTL) before and after long thermal effect is considered. It was found that a structure and properties have no difference from base alloy.

Key words: superalloy, refractory crow-bar, structure, properties, distribution of alloying elements.

УДК 669.14.018

Д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий

Национальный технический университет, г. Запорожье

ОБ АНОМАЛЬНОЙ ПОГРАНИЧНОЙ АДсорБЦИИ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ В ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

Рассматриваются особенности перераспределения примесных атомов с большим размерным фактором между объемом и межзеренными границами однокомпонентной металлической матрицы. С использованием термодинамических представлений сделана попытка объяснить экстремальное изменение термодинамического потенциала границ зерен при их обогащении крупноразмерными атомами примесной добавки.

Ключевые слова: адсорбция, химический потенциал, термодинамический потенциал.

Рассмотренное ранее аномальное изменение зернограничной энергии при микролегировании лантаноидами высокочистых рения и железа, а также их сплавов свидетельствует, что пограничная адсорбция ато-

мов РЗМ (а также иттрия) (атомы с большим размерным фактором) не подчиняется адсорбционной изо-терме Гиббса. Это, естественно, не укладывается в рамки общепринятых представлений, поскольку счи-