

УДК 620.17:620.1:669.245

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ІТРИЄМ НА СТРУКТУРУ ІВЛАСТИВОСТІ ВИЛИВКІВ, ОТРИМАНИХ З ВОРОТТЯ СПЛАВУ ЖС6У-ВІ

- Тьомкін Д. О. заступник головного металурга Запорізького машинобудівного заводу ім. Омельченка В.І., м. Запоріжжя, Україна, e-mail: tajdv678@gmail.com;
- Клочихін В. В. канд. техн. наук, головний металург АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com
- Данилов С. М. директор Запорізького машинобудівного заводу ім. Омельченка В.І., м. Запоріжжя, Україна, e-mail: m_zmzmotor@ukr.net
- Педаш О. О. канд. техн. наук, керівник бюро АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com
- Наумик О. О. молодший науковий співробітник науково-дослідної частини, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: enaulyk2003@gmail.com
- Наумик В. В. д-р техн. наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи та міжнародної діяльності Національного університету «Запорізька політехніка», професор кафедри машин та технології ливарного виробництва, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vnaulyk@gmail.com

Мета дослідження. Вивчити вплив модифікування присадками нікель-ітрієвої лігатури на структуру і фізико-механічні властивості сплаву ЖС6У-ВІ, виплавленого із застосуванням в шихті власного технологічного вороття.

Методи дослідження. На установці УППФ-3М з основним тиглем проводили дослідні плавки кондиційного технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ із застосуванням високотемпературної обробки розплаву.

З отриманих зливків, порізаних на мірні шихтові заготовки та очищених в дробометному барабані, методом рівноосної кристалізації в керамічних формах відливалися дослідні зразки для механічних випробувань та визначення тривалої міцності.

При заливанні однієї керамічної форми, розплав металу при температурі 1540 °С, піддавався модифікуванню нікель-ітрієвою лігатурою марки ІтНІ (розмір зерна 2...5 мм) у кількості 0,136% від маси шихти в тиглі з витримкою 1 хв. 15 с ... 1 хв. Другий блок заливався без модифікування.

Охолодження залитих блоків проводилося на плавильній ділянці за нормальної температури навколишнього середовища.

Зразки проходили термообробку згідно з ОСТ 1 90126-85: нагрів до температури 1210 ± 10 °С, витримка протягом 4 годин, охолодження на повітрі.

Розрахунково-аналітичним методом оцінювали збалансованість хімічного складу дослідних сплавів.

Визначали хімічний склад сплаву дослідних варіантів. Досліджували мікроструктуру, механічні властивості при кімнатній температурі. Випробування на тривалу міцність проводили при 975 °С під навантаженням 230 МПа.

Отримані результати. Проведено дослідні плавки шихти, що складалась виключно з власного технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ із застосуванням високотемпературної обробки розплаву та модифікування нікель-ітрієвої лігатурою.

Вивчено хімічний склад, мікроструктура дослідного сплаву, його механічні властивості при кімнатній температурі, та показники жароміцності.

Запропоновано методіку визначення ступеня збалансованості хімічного складу сучасних жароміцних сплавів за сумарним вмістом груп легувальних елементів.

Наукова новизна. Розрахунки, проведені згідно із запропонованою методикою визначення ступеня збалансованості хімічного складу сплаву показують, що для дослідних варіантів по межах зерен можуть утворюватися виділення фаз. Дослідженнями мікроструктури підтверджено виділення евтектичної фази γ - γ' у вигляді «білої» облямівки по потовщених межах зерен в металі зразка сплаву ЖС6У-ВІ.

Згідно з розрахунками збалансованості системи легування металу дослідних плавок може спостерігатися не тільки потовщення меж зерен та виділення евтектичної фази γ - γ' , а й зниження механічних властивостей та тривалої міцності.

Застосування модифікування нікель-ітрієвої лігатурою у кількості 0,136 % у процесі переплаву із застосуванням високотемпературної обробки розплаву вороття сплаву ЖС6У-ВІ дозволяє забезпечити формування меж зерен без видимих виділень (забруднень).

© Тьомкін Д. О., Клочихін В. В., Данілов С. М., Педаш О. О., Наумик О. О., Наумик В. В., 2022

DOI 10.15588/1607-6885-2022-2-9

Встановлено, що у металі дослідної плавки із застосуванням модифікування нікель-ітрієвої лігатурою карбідів мають глобулярну та пластинчасту морфологію. Виділення евтектичної фази $\gamma-\gamma'$ відсутнє.

Механічні властивості і тривала міцність металу дослідних плавок із застосуванням високотемпературної обробки розплаву кондиційного вороття сплаву ЖС6У як із модифікуванням, так і без модифікування нікель-ітрієвою лігатурою відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85, але при цьому нижче властивостей сплаву, відлитого із освіженням шихти.

Практична цінність. Запропоновано розрахунково-аналітичний спосіб визначення ступеня збалансованості хімічного складу сучасних жароміцних сплавів за сумарним вмістом певних груп легувальних елементів.

Встановлено, що модифікування присадками нікель-ітрієвої лігатури суттєво покращує мікроструктуру виливків, отриманих з технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ, та створює умови для загального покращення якості матеріалу відповідальних виливків.

Проведені дослідження показують, що використання 0,136% нікель-ітрієвої лігатури дозволяє очистити межі зерен, змінити морфологію неметалевих включень та протидіяти виділенню евтектичних включень у жароміцних нікелевих сплавах.

Ключові слова. Жароміцний нікелевий сплав, вороття, модифікування, нікель-ітрієва лігатура, мікроструктура, фізико-механічні властивості, жароміцні властивості.

Для виготовлення литих деталей ротора та статора турбіни силових установок як авіаційних, так і наземного базування застосовується сплав ЖС6У-ВІ [1–5].

Для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей деталі ротора рекомендується відливати з матеріалу вихідної плавки сплаву ЖС6У-ВІ з допустимим застосуванням вороття сплаву до 50%, а для деталей статора – до 80 % кондиційного вороття сплаву. Кондиційне вороття сплаву у процесі взаємодій з керамічною формою, тиглем та атмосферою печі насичується шкідливими домішками [3, 6, 7].

Шкідливі домішки, виділяючись по межах зерен у неметалевих включеннях, в евтектичній фазі або окремій фазі, можуть знижувати механічні, жароміцні та експлуатаційні властивості деталей [3, 6–10]. При виготовленні деталей методами лиття необхідно застосувати освіження сплаву додаванням матеріалу вихідної плавки, що дозволяє мінімізувати вплив шкідливих домішок, що потрапляють у сплав з технологічним вороттям.

Ф.Ф. Хімушиним [11] встановлено, що підвищення сумарного вмісту алюмінію і титану в жорстких нікелевих сплавах обмежує допустимий вміст хрому, молібдену, вольфраму, ніобію і танталу. Крім того, надмірне легування нікель-хромистих сплавів феритоутворюючими елементами, а саме хромом, молібденом, вольфрамом, титаном і алюмінієм веде до появи двофазності ($\gamma+\alpha$) і σ -фази, що різко погіршує їх жароміцність. Для сплавів із титаном та алюмінієм критичною є сума $Al+Ti+0,5$ %. Однак з часу проведення згаданих досліджень ступінь легування жароміцних нікелевих сплавів суттєво підвищився, і означені рекомендації вимагають чисельного уточнення з метою адаптації до сучасних умов.

У багатьох роботах [1–5, 7, 12] зазначено, що модифікуючий вплив рідкісноземельних металів (РЗМ) на структуру жароміцних сплавів проявляється у подрібненні мікрозерен, зменшенні розмірів дендритного осередку, зміні морфології та розподілу неметалевих включень.

Ітрії як поверхнево-активний елемент, накопичуючись на межі твердої та рідкої фаз, викликає підвищення в'язкості розплаву та уповільнення зростання твердої фази за рахунок гальмування дифузійних процесів [1–5, 7].

Як показують дослідження [1–5, 7] оптимальним вмістом ітрію в сплаві є 0,01%, що забезпечує стабілізацію карбідів типу МС, без утворення самостійних евтектичних фаз.

Метою даної роботи є дослідження впливу модифікування ітрієм на структуру і властивості виливків, отриманих з технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ, та оцінка принципової можливості відновлення сплаву ЖС6У-ВІ до рівня якості матеріалу вихідних плавок.

Матеріали та методика досліджень

Для проведення роботи з кондиційного технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ із застосуванням високотемпературної обробки розплаву (ВТОР) було проведено дослідні плавки та виготовлено два зливки за наступною технологією:

- вакуумування плавильної камери установки УППФ-3М до глибини вакууму 5×10^{-3} мм рт. ст.;
- нагрів розплаву у вакуумі до температури 1600...1650 °С;
- створення в плавильній камері захисної атмосфери аргону;
- нагрівання розплаву до температури 1830...1870 °С з витримкою при цій температурі протягом 10...12 хвилин;
- вакуумування та охолодження розплаву до температури заливки 1420...1450 °С;
- заливання металу в кокіль.

З отриманих зливків, порізаних на мірні шихтові заготовки та очищених в дробометному барабані, методом рівноосної кристалізації в керамічних формах відливались дослідні зразки для механічних випробувань та визначення тривалої міцності.

При заливанні однієї керамічної форми, розплав металу при температурі 1540 °С, піддавався модифікуванню нікель-ітрієвою лігатурою марки ІтН1 (розмір зерна 2...5 мм) у кількості 0,136 % від навішування

шихти в тиглі з витримкою 1 хв 15 с ... 1 хв (варіант 6УІ).

Другий блок заливався без модифікування (варіант 6УТ).

Охолодження залитих блоків проводилося на плазильній ділянці за нормальної температури навколишнього середовища.

Термообробку зразків проводили згідно з ОСТ 1 90126-85: нагрів до температури 1210 ± 10 °С, витримка протягом 4 годин, охолодження на повітрі.

Розрахунково-аналітичним методом оцінювали збалансованість хімічного складу дослідних сплавів.

Результати та обговорення

На основі досліджень Ф.Ф. Хімушина в монографії [11] та сучасних даних щодо розрахунково-аналітичного дослідження стабільності зміцнюючої γ' -фази [13–15], а також аналізу вихідних плавок сплаву ЖС6У-ВІ виробництва ВАТ «Ступінської металургійної компанії» співавтором цієї статті Тьомкіним Д.А. було розроблено метод визначення збалансованості хімічного складу, з урахуванням двох сум вмісту елементів (в % за масою): Cr+W+Mo та Ti+Al. Відповідно до зроблених висновків сумарні змісти зазначених елементів повинні перебувати у таких межах:

$$(Cr + W + Mo) = 20,2 \dots 20,8\%; (Ti + Al) = 7,8 \dots 8,2 \%$$

Хімічний склад залитих блоків із переплавленого із застосуванням ВТОР технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ наведено в таблиці 1.

Аналіз хімічного складу варіантів 6УІ та 6УТ на предмет структурної стабільності проведено відповідно до розробленої в Національному університеті «Запорізька політехніка» комплексної розрахунково-аналітичної методики [13–15] за наступними параметрами.

Параметр структурної стабільності

$$P_{mny} P_{mny} = (Cr / Cr + Mo + W), \% \text{ ат.}$$

Сумарна кількість електронних вакансій в γ розчині, Nv_{γ} .

Сумарна кількість валентних електронів в γ розчині, Md_{γ} .

Параметр дисбалансу системи легування ΔE .

Сумарна кількість валентних електронів у сплаві, Md_C .

Результати розрахунку параметрів структурної стабільності варіантів 6УІ та 6УТ зазначені у таблиці 2.

Розрахунок показав, що Nv_{γ} , Md_{γ} , Md_C не перевищує критичних параметрів утворення ТПУ фаз.

Дисбаланс системи легування, ΔE негативний і перевищує вимоги $\pm 0,04$, що вказує для варіантів 6УІ, 6УТ наявність у сплаві метастабільного стану та можливих фазових перетворень першого роду з утворенням гетеротипних сполук (σ , μ , M_6C та ін.) [1, 2, 13].

Результати, отримані відповідно до запропонованого методу розрахунку збалансованості хімічного складу, наведено у таблиці 3.

Як видно з результатів розрахунку для варіантів 6УІ і 6УТ по межах зерен може утворюватись «біла» облямівка (потовщення меж зерен) виділення евтектичної фази $\gamma-\gamma'$.

Причому оскільки значення сум знаходиться поблизу верхньої припустимої межі параметрів, можливо не тільки потовщення меж зерен та виділення евтектичної фази $\gamma-\gamma'$, але і зниження механічних властивостей та тривалої міцності, за рахунок ймовірного виділення ТПУ фаз (σ і χ - фази).

Результати випробувань механічних властивостей та тривалої міцності дослідних зразків варіантів 6УІ та 6УТ переплаву технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ із застосуванням ВТОР після термообробки наведено у таблиці 4.

Таблиця 1 – Хімічний склад матеріалу дослідних плавок технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ після ВТОР

| Варіант | Хімічний склад в %, за масою | | | | | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|------------|--------------|
| | C | Al | Ti | W | Mo | Cr | Co | Nb | Fe | Si | B |
| 6УІ | 0,185 | 5,55 | 2,65 | 10,4 | 1,9 | 8,83 | 9,8 | 1,0 | 0,37 | 0,09 | 0,014 |
| 6УТ | 0,16 | 5,51 | 2,65 | 10,4 | 1,6 | 8,9 | 9,7 | 1,08 | 0,16 | 0,09 | 0,02 |
| ОСТ 1 90126-85 | 0,13...0,2 | 5,1...6,0 | 2,0...2,9 | 9,5...11,0 | 1,2...2,4 | 8,0...9,5 | 9,0...10,5 | 0,8...1,2 | $\leq 1,0$ | $\leq 0,4$ | $\leq 0,035$ |

Таблиця 2 – Параметри структурної стабільності дослідних варіантів 6УІ та 6УТ

| Параметри структурної стабільності | Розрахунок для варіанта 6УІ | Розрахунок для варіанта 6УТ | Критичні значення параметрів утворення топологічно щільно упакованих (ТПУ) фаз [13] |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Nv_{γ} | 1,956077 | 1,974252 | $\leq 2,30$ |
| Md_{γ} | 0,884818 | 0,88659 | $\leq 0,93$ |
| ΔE | -0,245 | -0,212 | $\pm 0,04$ |
| Md_C | 0,934189 | 0,94051 | $0,98 \pm 0,08$ |

Таблиця 3 – Результати розрахунку параметрів збалансованості хімічного складу

| Варіант | (Cr+W+Mo), % | (Ti+Al), % |
|---------------------|---------------------------|----------------------|
| 6УІ | $(8,83+10,4+1,9) = 21,13$ | $(5,55+2,65) = 8,2$ |
| 6УТ | $(8,9+10,4+1,6) = 20,9$ | $(5,51+2,65) = 8,16$ |
| Припустимі межі сум | 20,2...20,8 | 7,8...8,2 |

Таблиця 4 – Механічні властивості та тривала міцність матеріалу дослідних плавок технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ після ВТОР

| Варіант | Механічні властивості | | Час до руйнування під навантаженням 230 МПа при 975 °С, год. |
|--|-----------------------|--------------|--|
| | σ_b , МПа | δ , % | |
| 6УІ | 1126 | 11,2 | 68,0; 55,0; 40,0 |
| | 934 | 4,0 | |
| 6УТ | 1045 | 6,0 | 69,0; 59,5; 50,0 |
| | 1055 | 9,6 | |
| Серійна технологія заливки деталей з освіженням АТ «Мотор Січ» | | | |
| 100 % похідної плавки | 994 | 4,4 | 102,0 |
| 50 % похідної плавки та 50 % вороття | 1011 | 4,8 | 108,5 |
| 20 % похідної плавки та 80 % вороття | 1014 | 4,4 | 84,0 |
| ОСТ 1 90126-85 | ≥ 850 | ≥ 3 | $\geq 40,0$ |



а, $\times 200$



б, $\times 200$

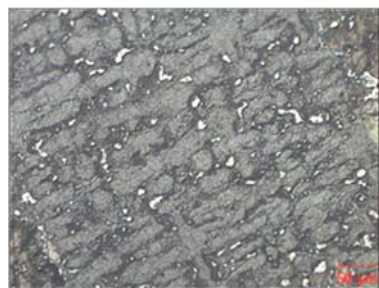


в, $\times 500$

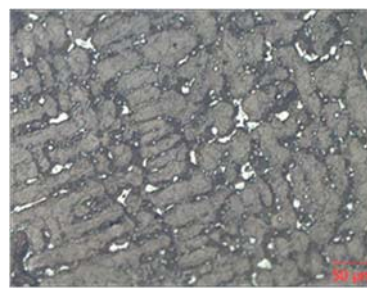


г, $\times 500$

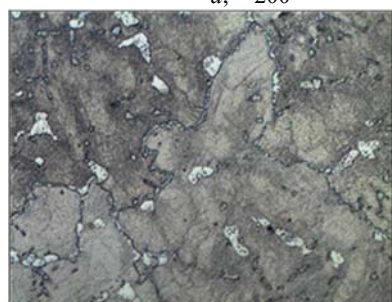
Рис. 1. Мікроструктура зразка сплаву ЖС6У-ВІ варіант 6УТ



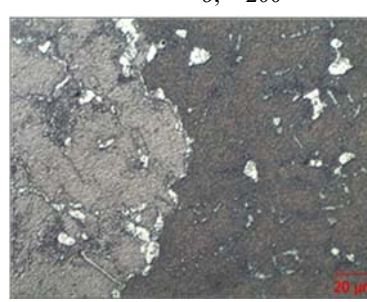
а, $\times 200$



б, $\times 200$



в, $\times 500$



г, $\times 500$

Рис. 2. Мікроструктура зразка сплаву ЖС6У-ВІ варіант 6УІ

Як видно з таблиці 4, механічні властивості та тривала міцність варіантів 6УІ та 6УТ знаходиться приблизно на одному рівні, але значення тривалої міцності є нижчими, за результати випробування тестових литих зразків виготовлених із освіженням (серійна технологія АТ «Мотор Січ»).

При проведенні металографічного дослідження зразків після випробувань механічних властивостей було виявлено, що для варіанта 6УТ є характерними локальні потовщення меж зерен, грубі виділення по межах зерен карбідної фази; також всередині зерен є виділення евтектичної фази $\gamma\text{-}\gamma'$ (рис. 1).

Для варіанта 6УІ виділень по межах зерен практично немає. Межі зерен тонкі. Карбіди мають глобулярну та пластинчасту морфологію. Виділення евтектичної фази $\gamma\text{-}\gamma'$ відсутні (рис. 2).

Висновки

Проведено дослідні плавки шихти, що складалась виключно з власного технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ із застосуванням високотемпературної обробки розплаву та модифікування нікель-ітрієвої лігатури.

Розрахунки, проведені згідно із запропонованою методикою визначення ступеня збалансованості хімічного складу сплаву показують, що для дослідних варіантів по межах зерен можуть утворюватися виділення фаз. Дослідженнями мікроструктури підтверджено виділення евтектичної фази $\gamma\text{-}\gamma'$ у вигляді «білої» облямівки по потовщеннях меж зерен в металі зразка сплаву ЖС6У-ВІ варіанту 6УТ.

Згідно з розрахунками збалансованості системи легування металу дослідних плавок може спостерігатися не тільки потовщення меж зерен та виділення евтектичної фази $\gamma\text{-}\gamma'$, а й зниження механічних властивостей та тривалої міцності.

Застосування модифікування нікель-ітрієвої лігатури у кількості 0,136 % у процесі переплаву із застосуванням високотемпературної обробки розплаву вороття сплаву ЖС6У-ВІ дозволяє забезпечити формування меж зерен без видимих виділень (забруднень).

Встановлено, що у металі дослідної плавки із застосуванням модифікування нікель-ітрієвої лігатури карбіди мають глобулярну та пластинчасту морфологію. Виділення евтектичної фази $\gamma\text{-}\gamma'$ відсутні.

Механічні властивості і тривала міцність металу дослідних плавок із застосуванням високотемпературної обробки розплаву кондиційного вороття сплаву ЖС6У-ВІ як із модифікуванням, так і без модифікування нікель-ітрієвою лігатури відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85.

Таким чином підтверджено позитивний вплив модифікування ітрієм на якість матеріалу виливків, виготовлених виключно з власного технологічного вороття сплаву ЖС6У-ВІ із застосуванням високотемпературної обробки розплаву. При цьому значення показників тривалої міцності матеріалу дослідних зразків сплаву ЖС6У-ВІ, хоча і відповідають вимогам нормативно-технічної документації, але є нижчими, за результати

випробування тестових литих зразків виготовлених із освіженням (серійна технологія АТ «Мотор Січ»).

Список літератури

1. Симс Ч. Жаропрочные сплавы / Ч. Симс, В. Халгель // Пер. с англ. под ред. Савицкого Е. М. – М. : Металлургия, 1976. – 567 с.
2. Симс Ч. Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок : в 2-х кн. / Под ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столофа, У. К. Хагеля ; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1995. – Кн. 1. – 384 с. ; кн. 2. – 384 с.
3. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Каблов Е. Н. – М. : «МИСИС», 2001. – 632 с.
4. D.V.V. Satyanarayana N.E. Prasad. Nickel-based superalloys - Aerospace Materials and Material. Volume 1: Aerospace Materials, 2017, P. 199–228.
5. Badeer G. H. GE Aeroderivative Gas Turbines - Design and Operating Features / G.H. Badeer // GE Power Systems. – 2000. – 20 p.
6. V. Klochikhin and V. Naumyk “Improvement of technological processes obtaining a heat-resistant nickel alloys for turbine blades using foundry return” MS and T 2019, Materials Science and Technology 2019, P. 1454–1458.
7. Ресурсозберігаючі технології виробництва литва для авіаційного двигунобудування. Монографія / Богуслаєв В. О., Балушок К. Б., Ключихін В. В. та ін. – Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2021 р. – 197 с.
8. Беликов С. Б. Влияние некоторых легирующих элементов на коррозионную стойкость никелевых сплавов при высоких температурах / Беликов С. Б. // Энергомашиностроение. – 1980. – № 11. – С. 27–28.
9. Crystallization processes, structure and properties of castings from high-temperature nickel alloys / Tsvirko, É. I., Zhemanuyk, P. D., Klochikhin, V. V., Naumik, V. V., Lunev, V. V. // Metal Science and Heat Treatment – 2001. – № 43(9–10). – P. 382–386.
10. V. L. Greshta, 2017 “Structural liability of sheet-rolled corrosion-resistant ferritic steels to a plastic deforming,” Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, 39(9), P. 1213–1225.
11. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Химушин Ф. Ф. – М. : Металлургия, 1969 – 748 с.
12. Some peculiarities of alloying of nickel superalloys resistant to high-temperature corrosion Sanchugov, Y.L. Koval, A.D. Belikov, S.B. // NACE-International Corrosion Conference Series, 2012, 4, P. 3435–3438.
13. Гайдук С. В. Комплексная расчетно-аналитическая методика для про-ектирования литейных жаропрочных никелевых сплавов / С. В. Гайдук // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 2. – С. 92–103.
14. Гайдук С. В. Комплексная расчетно-аналитическая методика для проектирования литейных жаропрочных никелевых сплавов с требуемыми служебными свойствами / С. В. Гайдук, Т. В. Тихомирова // Металлургическая и горнорудная промышленность. –

2016. – № 5(302). – С. 62–69.

15. Гайдук С. В. Прогнозирование структурной и фазовой стабильности экономнолегированного жароп-

рочного сплава для ответственных отливок / С. В. Гайдук, О. В. Гнатенко, В. В. Наумик // Вісник ДДМА. – 2011. – № 4 (25). – С. 40–43.

Одержано 01.12.2022

THE INFLUENCE OF MODIFICATION WITH YTTRIUM ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CASTINGS OBTAINED FROM THE ЖС6У-ВІ ALLOY RETURN

- Tomkin D. Deputy of head metallurgist in Zaporizhzhia Omelchenko machine-building plant, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tajdv678@gmail.com;
- Klochikhin V. Candidate of Technical Sciences, Chief Metallurgist Engineer, “Motor Sich” JSC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com;
- Danylov S. Director of the Zaporizhzhia Omelchenko machine-building plant, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: m_zmzmotor@ukr.net
- Pedash O. Candidate of Technical Sciences, bureau chief in “Motor Sich” JSC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com;
- Naumyk O. Junior researcher, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: enaumyk2003@gmail.com;
- Naumyk V. Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work and International Affairs National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Professor of the Department of Machinery and Technology Foundry, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vnaumyk@gmail.com

Purpose. To study the effect of modification of nickel-yttrium ligature with additives on the structure and physical and mechanical properties of ЖС6У-ВІ alloy, smelted using its own technological return in the charge.

Research methods. On the УППФ-3М installation with the base crucible, experimental melting of standart technological return of the ЖС6У-ВІ alloy was carried out using high-temperature melt processing.

Experimental samples for mechanical tests and determination of stress-rupture strength were cast from the obtained ingots, cut into measured batch blanks and cleaned in a shot blasting drum, using the method of equiaxial crystallization in ceramic molds.

When pouring one ceramic mold, the metal melt at a temperature of 1540 °C was modified with a nickel-yttrium ligature of the ImH1 brand (grain size 2...5 mm) in the amount of 0.136 % of the mass of the charge in a crucible with a holding time of 1 min 15 s ... 1 min. The second block was poured without modification.

Cooling of the poured blocks was carried out at the melting site at normal ambient temperature.

The samples underwent heat treatment according to OCT 1 90126-85: heating to a temperature of 1210 ± 10 °C, holding for 4 hours, cooling in air.

The balance of the chemical composition of the experimental alloys was evaluated by the computational and analytical method.

The chemical composition of the alloy of experimental variants was determined. The microstructure and mechanical properties at room temperature were studied. Stress-rupture strength tests were performed at 975 °C under a load of 230 MPa.

Results. Experimental melting of the charge was carried out, which consisted exclusively of our own technological return of the ЖС6У-ВІ alloy with the use of high-temperature processing of the melt and modification with a nickel-yttrium ligature.

The chemical composition, microstructure of the experimental alloy, its mechanical properties at room temperature, and heat resistance indicators were studied.

A method of determining the degree of balance of the chemical composition of modern superalloys based on the total content of groups of alloying elements is proposed.

Scientific novelty. Calculations carried out in accordance with the proposed method of determining the degree of balance of the chemical composition of the alloy show that for the experimental variants, phase separations may form along the grain boundaries. Studies of the microstructure confirmed the separation of the γ-γ' eutectic phase in the form of a “white” border along the thickened grain boundaries in the metal of the ЖС6У-ВІ alloy sample.

According to the calculations of the metal alloying system balance for experimental melts, not only the thickening of the grain boundaries and the separation of the γ - γ' eutectic phase, but also a decrease in mechanical properties and stress-rupture strength can be observed.

The application of modification with nickel-yttrium ligature in the amount of 0.136 % in the remelting process with the use of high-temperature processing of the ЖС6У-ВІ alloy return melt allows to ensure the formation of grain boundaries without visible discharges (pollution).

It was established that in the metal of the experimental melting with the application of modification with nickel-yttrium ligature, carbides have globular and lamellar morphology. There is no separation of the γ - γ' eutectic phase.

The mechanical properties and stress-rupture strength of the metal of the experimental melts with the use of high-temperature processing of the melt of the conditioned return of the ЖС6У-ВІ alloy, both with and without modification by nickel-yttrium ligature, meet the requirements of OST 1 90126-85, but at the same time, they are lower than the properties of the alloy cast with charge refreshment.

Practical value. A computational and analytical method of determining the degree of balance of the chemical composition of modern heat-resistant alloys based on the total content of certain groups of alloying elements is proposed.

It was established that the modification of nickel-yttrium ligature with additives significantly improves the microstructure of castings obtained from the technological return of the ЖС6У-ВІ alloy and creates conditions for a general improvement in the quality of the material of the responsible castings.

The conducted studies show that the use of 0.136 % nickel-yttrium ligature allows to clean grain boundaries, change the morphology of non-metallic inclusions and counteract the segregation of eutectic inclusions in nickel-based superalloys alloys.

Key words: nickel-based superalloys, return, modification, nickel-yttrium ligature, microstructure, physical and mechanical properties, high-temperature strength.