

УДК 621.74

Кудін В.В.<sup>1</sup>, Бойчук Р.В.<sup>2</sup>, Шалдін О.М.<sup>3</sup>, Кармазін М.О.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя

<sup>2</sup> аспірант, НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя

<sup>3</sup> аспірант, НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя

<sup>4</sup> аспірант, НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ГАРЯЧИМ ІЗОСТАТИЧНИМ ПРЕСУВАННЯМ (ГП)**

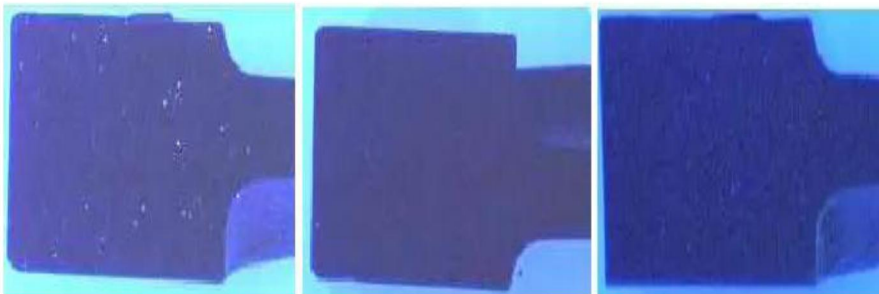
Жароміцні сплави на основі нікелю є дуже складними, володіють великими властивостями та широко використовуються для виготовлення деталей, що зазнають дії значних температур. З них виготовляються більше 50% деталей сучасних газотурбінних авіаційних двигунів. Ці сплави забезпечують гарне поєднання високої жароміцності, жаростійкості, окислостійкості та технологічності. Температура працездатності деталей з таких сплавів варіюються з 750°C до 1100°C. Одним із перспективних напрямків для поліпшення та вдосконалення якості виливків відповідального призначення є гаряче ізостатичне пресування (ГП), яке пов'язано з

видаленням внутрішніх дефектів, таких як пористість, внутрішня усадка та міждендритні тріщини, що утворюються в процесі кристалізації металу. ГПП сприяє тому, що дефекти за рахунок змикання пустот за механізмами повзучості, а далі дифузійним зварюванням поверхонь мікропор, виливки набувають гомогенну, повністю щільну структуру.

Вивчали вплив гарячого ізостатичного пресування на установці HIRP 25/70-200-2000 фірми ABRA на робочих лопатках із сплаву ЖС6К-ВІ. ГПП здійснювався по режиму: вакуумування – 1 год.; вирівнювання тиску до  $(25\pm 5)$  МПа – 1 год.; нагрів до  $1040\pm 10$  °С із швидкістю 8-10°С/хв.; витримка  $(1040\pm 10)$ °С – 1,5 год.; тиск у СВД 1040°С – 120 МПа; нагрів  $1210\pm 10$ °С із швидкістю 4°С/хв.; витримка при  $1210\pm 10$ °С – 1,5 год.; тиск у СВД – 160 МПа; охолодження виливків до 300°С зі швидкістю 26°С/хв.; вирівнювання тиску; скидання залишкового тиску в атмосферу.

На поверхні лопаток після ГПП виявлені неметалеві включення темно-сірого кольору характерні для оксидів, що знаходилися на глибині біля 10 мкм, після термічної обробки окислення практично відсутнє, що обумовлено вакуумним очищенням поверхні в процесі ГПП. Рентгеноспектральний мікроаналіз показав, що на поверхні лопаток спостерігався підвищений вміст кисню, алюмінію, титану та вуглецю приблизно у три рази, в порівнянні з концентрацією елементів на поверхні лопаток до проведення ГПП. Застосування ГПП призвело до дифузійного масопереносу від центру до поверхні з утворенням шарів із атомів алюмінію та титану.

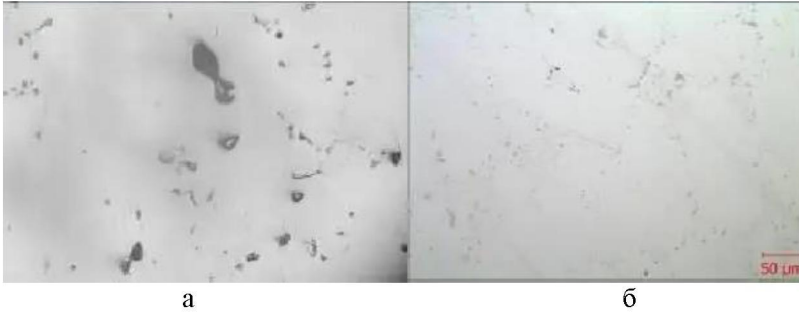
Люмінесцентним контролем виявлено, що до проведення ГПП були свідчення у вигляді багатьох мілко яскраво крапок, що світяться (рис. 1 а). В аналогічних перерізах лопаток після проведення ГПП та термічної обробки світіння люмінофора не виявлено (рис. 1 б, в).



а – до ГПП; б – після ГПП; в – після ГПП + термічна обробка.

Рисунок 1 – Вид лопаток при ультрафіолетовому кольорі.

При металографічних дослідженнях виявленні невеликі мікропори розміром до 110 мкм (рис. 2 а). Карбіди типу MeC виділялися у вигляді дискретних глобулярних частинок та пластин, розміщених переважно в междендритних просторах та по межах зерен. Після ГП без та термічної обробки лопаток зменшилася кількості пор. В структурі лопаток після ГП мікропори у внутрішніх об'ємах металу практично були відсутні (рис. 2 б).



а – до ГП; б – після ГП.

Рисунок 2 – Мікроструктура робочих лопаток із сплаву ЖС6К-В1,  $\times 200$ .

При вивченні макроструктури встановили, що ГП та термічна обробка сприяли зміні макрозерна (рис. 3), що позитивно впливало на фізико-механічні властивості та жароміцність робочих лопаток.

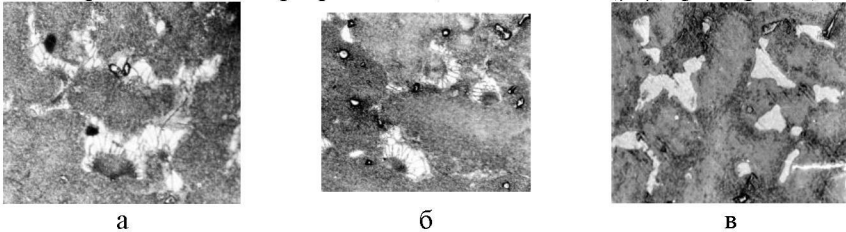


а – до ГП; б – після ГП + термічна обробка.

Рисунок 3 – Макроструктура травлених шліфів лопаток.

Металографічним дослідженням встановлено, що структурними складовими лопаток є:  $\gamma$ -твердий розчин; інтерметалідна  $\gamma'$ -фаза; карбіди; карбонітриди та евтектична ( $\gamma+\gamma'$ ) фаза. Розмір структурних складових, а також відстань між всіма дендритів у лопатках в 2 рази були менше, ніж в лопатках до обробки ГП. В структурі лопаток після ГП спостерігалось

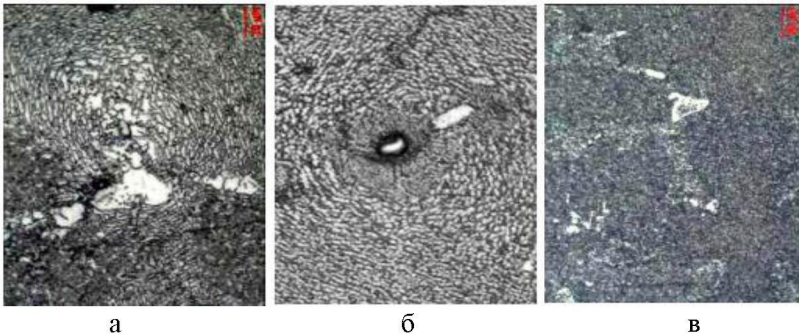
часткове розчинення та перекристалізація евтектичної ( $\gamma+\gamma'$ ) фази (рис. 4).



а – до ГП; б – після ГП; в – після ГП + термічна обробка.

Рисунок 4 – Мікроструктура сплаву ЖС6К-VI та ( $\gamma+\gamma'$ ) фаза,  $\times 500$ .

Після ГП в місцях «загоювання» мікропор виявлено зони кратерообразної форми у вигляді концентрично розташованих витягнутих частинок інтерметалідної  $\gamma'$ -фази, характерні для «рафт»-структури (рис. 5 а). Дані зони розташовувалися в междендритних просторах та на кордонах зерен. Зони «рафт»-структури також знаходилися довкола деяких карбідів типу MeC (рис. 5 б). Встановлено, що з наближенням до центру зазначених ділянок, відбувалося збільшення щільності та зменшення інтерметалідної  $\gamma'$ -фази, розмір якої знаходився на рівні 0,22 - 0,33 мкм. В результаті пластичної деформації при ГП концентрація структурних компонентів, прилеглих до мікропор істотно зростає. Середній розмір мікрочастинок  $\gamma'$ -фази у віддалених зонах від мікропор становив 0,5 - 0,8 мкм.



а – до ГП; б – після ГП; в – після ГП + термічна обробка.

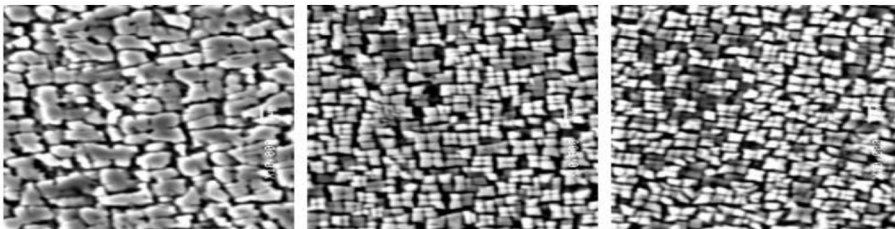
Рисунок 5 – Мікроструктура лопаток із сплаву ЖС6К-VI,  $\times 500$ .

В зонах «загоєння» мікропор у лопаток поряд з дрібними інтерметалідними частинками спостерігалися скупчення коагульованих та витягнутих частинок  $\gamma'$ -фази розміром 1,1 - 2,2 мкм. Розмір виявлених після ГП поодиноких мікропор становив  $\sim 0,25 - 6,0$  мкм, що приблизно у 20 разів

менше порівняно з порами, виявленими у лопатках до проведення ГП.

Таким чином, лопатки піддані ГП мали структурну неоднорідність внаслідок утворення «рафт»-структури у вигляді зональних ділянок, зосереджених у місцях «загоєння» мікропор, а також навколо деяких карбідів. В процесі пластичної деформації при ГП значна кількість пластинчастих карбідів, що розташовувалися в міждендритних просторах, набули дугоподібної форми з орієнтацією в напрямку утворення концентричних кіл. Загоєння мікропор, що розташовуються на поверхні деталей, не відбувалося. Це пояснюється механізмом баротермічного впливу, при якому зменшення мікропор може бути досягнуто тільки для внутрішніх об'ємів металу.

Термообробка після ГП сприяла практично повній перекристалізації інтерметалідної  $\gamma'$ -фази, завдяки розчиненню в  $\gamma$ -твердому розчині та повторному її виділенні у вигляді дисперсних частинок кубічної морфології з наявністю невеликої кількості коагульованої інтерметалідної  $\gamma'$ -фази, що виділялася в міждендритних просторах. Внаслідок зазначених структурних змін відбувалося усунення зональних ділянок «рафт»-структури, що утворювалася в процесі ГП у місцях «загоєння» мікропор та навколо карбідів, що призводило до покращення структурної однорідності (рис. 5 в). Також відбувалося розчинення евтектичної ( $\gamma+\gamma'$ ) фази та карбідів. При дослідженні інтерметалідної  $\gamma'$ -фази в осях та міжвісних просторах дендритів лопаток встановлено, що до проведення ГП частинки  $\gamma'$ -фази мали кубічну морфологію та утворюють блоки з чотирьох частинок (рис. 6 а).



а

б

в

а – до ГП; б – після ГП; в – після ГП + термічна обробка.

Рисунок 6 – Інтерметалідна  $\gamma'$ -фаза в лопатках із сплаву ЖС6К-ВІ,  $\times 10000$ .

Розмір  $\gamma'$ - частинок в осях дендритів становив 0,25 - 0,50 мкм у міжвісних просторах поруч із частинками розміром 0,3 - 1,0 мкм була значна кількість коагульованої  $\gamma'$ -фази до 2,5 мкм. Суттєвих відмінностей у морфології та величині інтерметалідної  $\gamma'$ -фази, що виділилася у хвостовій частині лопаток в порівнянні з пером, не спостерігалось. В структурі лопаток

після ГПП відбувалося подрібнення інтерметалідної  $\gamma'$ -фази (рис. 6 б) виявлено виділення невеликої кількості мікрочастинок  $\gamma'$ -фази розміром  $\sim 0,16$  мкм. При високому тиску переважно у міжвісних просторах дендритів формувалися  $\gamma'$ -частинки з нерівноважною морфологією, що помітно відрізняється від кубічної, з наявністю 60-градусних кутів за їх перерізами, а також у вигляді зональних ділянок «рафт»-структури в місцях «загоєння» мікропор та навколо деяких карбідів типу MeC. Різниця між розмірами  $\gamma'$ -частинок в осях та міжвісних просторах дендритів зменшувалася в порівнянні зі станом  $\gamma'$ -фази у зазначених зонах вихідного металу. В процесі термічної обробки, проведеної після ГПП відбувалося вирівнювання розмірів частинок інтерметалідної  $\gamma'$ -фази в осях та міжвісних просторах дендритів (рис. 6 в). Кількість коагульованих частинок  $\gamma'$ -фази розміром 0,52 - 1,1 мкм було незначне. В лопатках після ГПП (до та після термічної обробки) відбувалося зменшення пластинчастих (евтектичних) карбідів. Товщина карбідних пластин складала: до ГПП – 0,30 - 0,50 мкм; після ГПП – 0,125 - 0,18 мкм; після ГПП + ТО – 0,08 - 0,125 мкм.

Застосування ГПП сприяло підвищенню якості мікроструктури лопаток за рахунок зменшення мікропористості внаслідок «загоєння» мікропор. Термічна обробка після ГПП сприяла підвищенню пластичності лопаток із сплаву ЖС6К-ВІ, що обумовлено підвищенням структурної однорідності та зменшенням напружень, які утворювалися в процесі ГПП. Це позитивно вплинуло на фізико-механічні та жароміцні властивості робочих лопаток газотурбінних двигунів.