

горизонтальному напрямку ХУ. Виняток становлять характеристики міцності у зразках, отриманих за технологією газової атомізації, де відбулося деяке зниження показників в межах вимог стандарту AMS 5662.

Результати випробування тривалої міцності показують, що час до високотемпературного руйнування, відповідає вимогам стандарту на деформований матеріал AMS 5662. Значно більшим цей показник отримано на зразках, виготовлених у вертикальному напрямку із порошків відцентрового розпилення. Рівень тривалої міцності з порошків, отриманих за технологією газової атомізації, також вище у зразків, виготовлених у вертикальному напрямку. Це можна пояснити тим, що при випробуваннях на тривалу міцність навантаження прикладається до зразка в напрямі, перпендикулярному осі його побудови.

Таким чином, обидві проаналізовані технології виготовлення порошків забезпечують рівень механічних властивостей, що значно перевищує норми існуючих галузевих стандартів, а виготовлені порошки сплаву Inconel 718 придатні для отримання методом селективного лазерного сплавлення відповідальних деталей авіаційних двигунів.

**Квасницька Ю.Г., Максютя І.І., Михнян О.В., Нейма О.В., Квасницька К.Г.  
(ФТІМС НАН України, м. Київ)**

**УМОВИ ЕФЕКТИВНОГО ВИДАЛЕННЯ КРЕМНІЮ ТА СІРКИ З  
РОЗПЛАВІВ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ПРИ ВАКУУМНО-  
ІНДУКЦІЙНОМУ ПЛАВЛЕННІ**

E-mail: Neima\_Alex@ukr.net

Врахування ступеня рафінування розплавів жароміцних залізовуглецевих та нікелевих сплавів від газів та шкідливих домішок має великий вплив на якість литих деталей відповідального призначення. Ці домішки, які надходять до сплавів як з первинних, так і зі вторинних (кондиційні відходи) шихтових матеріалів, вогнетривких виробів (тиглі, форми, стрижні) при виплавлянні та розливанні у

вакуумних агрегатах, можуть мати негативний вплив на формування структури та рівень експлуатаційних характеристик.

Так, згідно прийнятому на галузевих підприємствах України технологічному регламенті, при виплавлянні сплавів вакуумно-індукційним методом (ВІ) з шихтових матеріалів з додаванням до 30 (% мас.) власного звороту, в сплав може переходити, наприклад, від 0,010 до 0,10 (% мас.) кремнію та сірки як з шихти, так і з кремнійвмісного зв'язуючого оболонкових форм. На відміну від плавлення на повітрі, де шкідливі домішки можуть видалятися з розплаву завдяки застосуванню, наприклад, шлаків, при виплавлянні у ВІ-печах видалення шляхом випаровування з шихтових матеріалів або шлаків неможливе через низьку пружність пари при температурах процесу.

З науково-технічної літератури та проведених авторами раніш фізико-хімічних досліджень доведено, що підвищення, наприклад, вмісту кремнію у розплаві пов'язано, окрім шихти, перед усім, з досить довгим контактом з керамікою вогнетривів – тиглями, завдяки високому вмісту муліту, формою, стрижнями, фільтрами. При цьому може проходити процес відновлення кремнію з незв'язаного оксиду кремнію, вміст якого у кераміці форми, наприклад, може складати до 10 – 15%, у стрижнях до 2 – 7 (% мас.).

Це сприяє утворенню пластинчастих карбідів типу  $M_6C$  та окрихчувальних топологічно щільно упакованих (ТЩУ) фаз і негативно впливає на тривалу міцність сплавів.

Негативний вплив **сірки** на жароміцність і жаростійкість сплавів пов'язаний, з її низькою розчинністю в нікелі, утворенням з нікелем легкоплавкої евтектики NiS з температурою плавлення 643 °С, сульфідів, оксисульфідів. Такого типу неметалеві вкраплення (**НВ**) є концентраторами напружень та ініціюють зародження тріщин при динамічних навантаженнях деталей.

Значну увагу в сучасній науково-патентній літературі приділено роботам, які спрямовані на теоретичне обґрунтування і практичне випробування рафінувального ефекту за рахунок введення до складу сплавів мікролегувальних добавок, наприклад, ітрію, церію, лантану, гафнію. Проведено детальний аналіз

діаграм їх фазового стану при взаємодії з основою сплаву, термодинамічний аналіз продуктів взаємодії добавок з домішками і компонентами сплаву, виявлені кристалографічні особливості цих фаз. Для доцільності застосування мікролегувальних добавок в якості рафінувальних у жароміцних нікелевих сплавах, використані відомості про їх електронегативність, вплив на структуру та властивості сплавів.

Серед рафінувальних добавок найбільш високу дифузійну рухливість має **ітрій**. Нейтралізуючу дію можуть здійснювати й інші елементи з групи РЗМ та лантаноїди, коефіцієнти дифузії яких нижче, ніж у ітрію. Тому їх позитивний вплив має виявлятися на більш пізніх етапах експлуатації.

За допомогою аналізу фізико-хімічних процесів та складених на основі цього теоретичних уявлень, також фізичного та математичного моделювання, було сформовано **МЕТУ** та поставленні **завдання** для виконання роботи, а саме: виявити найбільш ефективні засоби рафінування розплавів від шкідливих домішок, у даному випадку, від кремнію та сірки, а також, технологічні параметри їх втілення в умовах ВІ виплавляння.

Як показує аналіз наукової літератури та результатів попередніх практичних випробувань авторів, найбільш ефективним є поєднання засобів очищення, тобто повної або часткової нейтралізації шкідливих домішок дозованим введенням мікролегувальних елементів до складу сплавів з подальшим рафінуванням розплаву застосуванням фільтруючих пристроїв.

В якості об'єктів досліджень були вибрані розроблені за участю авторів у ФТІМС НАН України жароміцні високохромисті залізовуглецеві та нікелеві сплави (типу ХН60КМЮВТ), та виливки з них для деталей енергомашинобудування.

Температури основних фазових перетворень ( $TS$ ,  $TL$ ) виявляли методом диференціальної сканувальної калориметрії (ДСК) на високочастотному синхронному термічному аналізаторі Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України (STA 449F1, німецька фірма NETZSCH, точність вимірювань температур  $\pm 1,5$  °С. На ливарному агрегаті УППФ-2 зі сплавів

отримували циліндричні заготовки, зразки-свідки та робочі деталі для контролю хімічного складу, структурно-фазових особливостей, ступеня рафінованості, а також фізико-механічних характеристик. Швидкість лінійної фільтрації розплаву при заливанні в оболонкову форму складала 0,05–0,1 м/с при висоті стояку 0,1–0,4 м, заливки розплаву у форми від 5 до 12 кг/с. Контроль температури проводили термопарою та оптичним пірометром типу Mikron (модель M-780).

Хімічний склад виливків із запропонованих сплавів визначали за допомогою аналітичного комплексу зі сканувального електронного мікроскопа JSM-35CF фірми «JEOL» (Японія) і рентгенівського спектрометра з дисперсією за енергії рентгенівських квантів (модель INCA Energy-350 фірми «Oxford Instruments», Великобританія).

Температуро-часові залежності протікання кристалізації розплаву отримано за допомогою встановлених на поверхнях керамічної оболонки, а також в середньому перетині вилівка і в піднадливній області, термопарах. Ці дані дали можливість оцінити здатність розплаву до збереження рідкотекучого стану у визначені моменти часу в різних перетинах вилівка зі вбудованим в ливникову систему фільтруючим пристроєм.

Завдяки лабіринтно-комірчастій структурі фільтра заповнення порожнини форми відбувалося в режимі, близькому до ламінарного. Важливою складовою технологічного процесу рафінування був вибір ефективного типу фільтрів (матеріал, поруватість, геометрія), як показано в роботах авторів. Порівняння існуючих функціональних параметрів різних типів фільтруючих вогнетривких матеріалів показує, що для жароміцних сплавів вакуумного виплавляння, високоефективними при внутрішньоформенній фільтрації для вловлювання достатньо дисперсних НВ, можуть бути, перед усім, пінокерамічні фільтри (ПКФ).

Кількість НВ оцінювали за такими параметрами: за сумарною кількістю на кожному з 10 полів зору, в (% мас.) від маси зразка при хімічній екстракції включень різного типу, за густиною НВ (кількість частинок на 1 мм<sup>2</sup>), за довжиною одиничних вкраплень, мкм. Під час кристалізації розплаву **кремній**,

при перевищенні його концентрації в розплаві більш 0,3 (% мас.), сегрегуючи по границях зерен, збільшує кількість евтектичної  $\gamma'$ -фази.

Авторами показано, що ефективним методом для дослідженого типу сплавів може бути зв'язування домішок **кремнію** в тугоплавкі сполуки шляхом мікролегування **ітрієм**, який здатний створювати з кремнієм тугоплавкі сполуки, температура плавлення яких  $\sim 2600$  °С.

За результатами кількісного аналізу НВ було встановлено, що найбільша кількість НВ – у вихідних зливках, які не були рафіновані, після мікролегування та фільтрації розплав при виплавлянні виливків кількість НВ знизилась. Спостерігається також зниження максимального розміру довжини включень: від 92 мкм (середня) до 28 мкм (середня). Концентрація у первинних нерафінованих ВІ-заготовках становила до 0,0022 сірки та кремнію, (% мас.), об'ємна частка НВ у виливках після рафінування первинних ВІ-заготовок, склала від 0,80 до 2,20 (% мас.).

Досліджено, що **лантан**, при введенні до легувального комплексу вибраних сплавів, зв'язує **сірку** у тугоплавкі термодинамічно міцні сульфідні LaS, які частково видаляються з розплав за рахунок як адгезії на стінках плавильного тигля при плавці, так і при фільтрації розплав за допомогою ПКФ при розливанні. При цьому різко знижується вміст легкоплавких сульфідів у виливках, більш впорядкованою та однорідною стає макро- та мікроструктура деталей (рис. 1, 2).

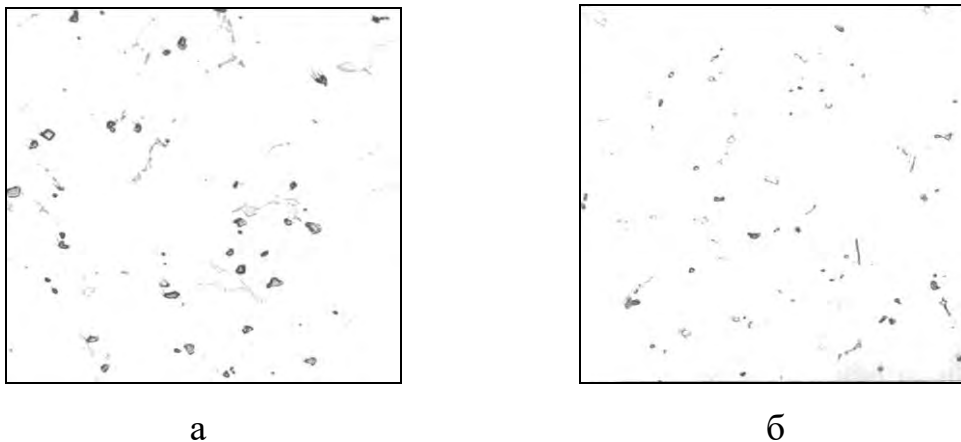


Рис. 1. Вплив мікролегування та рафінування на густину неметалевих вкраплень у виливках дослідних сплавів: а – стан після лиття у вихідних зливків, х800; б – після введення мікролегувальних елементів та рафінування ПКФ, х800

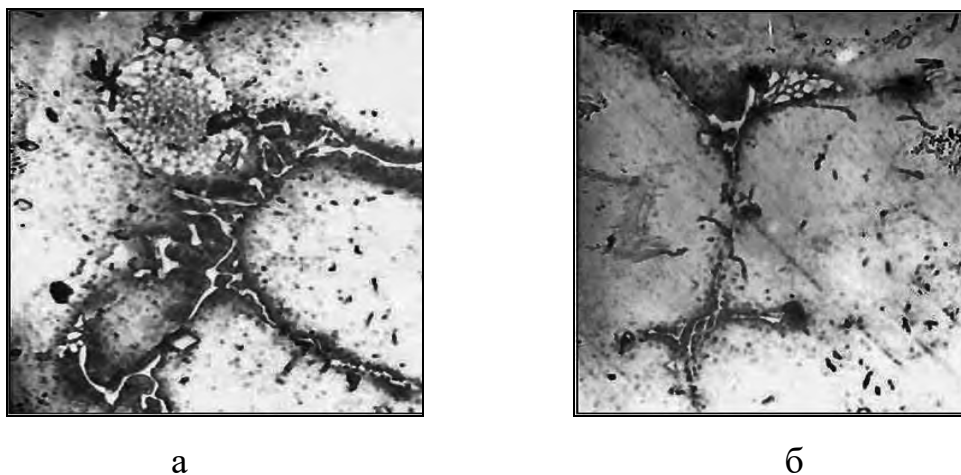


Рис. 2. Фрагменти мікроструктури зразків дослідного сплаву до (а) та після (б) мікролегування та рафінування, х800

Вивчення локального хімічного складу зразків з жароміцного нікелевого сплаву з 0,15 (% мас.) **кремнію** дозволило встановити, що домішки **сірки та кремнію** переважно розташовуються поблизу і всередині пор у металі, причому останній в досить великій кількості, що свідчить про те, що присутні оксиди **кремнію**. Вони мають підвищену крихкість і підсилюють ефект пори в якості місця концентратора напружень і можливого утворення мікротріщин. У зразках з 0,32 (% мас.) Si перераховані вище домішки концентруються в основному близько дефектів (пор, мікротріщин) і скупчень ітрію, що передбачає наявність сполук кремнію з ітрієм.

#### **Висновки:**

1. Визначено умови ефективного видалення з розплаву домішок кремнію та сірки різними методами: фазово-структурним, тобто введенням (мікролегуванням) хімічно активних добавок ітрію та лантану, також управлінням кінетикою процесу, тобто температурою і тривалістю рафінування розплаву за допомогою використання керамічних фільтрів, склад яких розроблено у ФТІМС НАН України та які пройшли випробування на підприємствах машинобудування України.

2. Встановлено, що внаслідок підвищеної концентрації домішок кремнію та сірки у вихідних зливках жароміцних сплавів після ВІ виплавляння,

неоднорідності розподілу їх в локальних ділянках твердого розчину структури нерафінованих сплавів, термодинамічна стабільність виливків знижується. Домішки порушують когерентний зв'язок між  $\gamma$ - і  $\gamma'$ -фазами, підвищують дифузійну проникність міжфазних границь. Це призводить до послаблення сили міжатомної взаємодії на міжфазних границях та може сприяти утворенню пор та тріщин на границях зерен і зниженню довговічності деталей.

3. Використання високотехнологічної апаратури показало, що при проведенні повної термічної обробки та подальшому високотемпературному старінні (1000 °С, 500 год), остаточною доля **ітрію та лантану**, що зосереджується на границях зерен, нейтралізує **кремній** та **сірку**, утворюючи пори з високотемпературними хімічно інертними включеннями різної морфології всередині (переважно, сульфід  $\text{LaS}$ , оксиди ітрію). Низьку швидкість перерозподілу остаточної неметалевої вкраплень можливо пояснити зниженням дифузійної проникності міжфазних границь та відновленням сил поверхневого натягу, що сповільнюють зріст пор і розвиток у процесі динамічного напруження тріщин, як це трактується в науковій літературі.

**Кивгило Б.В., Биба Є.Г., Ямшинський М.М., Мініцький А.В., Лук'яненко І.В.**  
*(КІІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ)*  
**БІМЕТАЛЕВІ ВИЛИВКИ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ**  
E-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com

В Україні та в інших країнах світу біметал, як прогресивний вид матеріалу знайшов застосування в багатьох галузях промисловості: у хімічній і нафтопереробній апаратурі, у машинобудуванні та приладобудуванні, у сільському господарстві та інструментальному виробництві. Застосування в різних галузях промисловості біметалів безперервно розширюється, що пов'язано з економією дефіцитних металів та складових компонентів сплавів: нікелю, хрому, міді, титану, молібдену тощо.