

Исследование влияния высокотемпературной газостатической обработки на структуру и свойства интерметаллидного сплава ВКНА-4

Базылева О.А.[†], Рассохина Л.И., Нефедов Д.Г., Рогалев А.М.

[†]lab3@viam.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, ул. Радио 17, 105005, Москва,

Проведено исследование влияния высокотемпературной газостатической обработки (ВГО) на структуру и микропористость отливок блоков сопловых лопаток и на усталостные характеристики интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al ВКНА-4, которые определены на заготовках с поликристаллической структурой. Показана положительная роль ВГО в повышении работоспособности и надежности интерметаллидного сплава при высоких температурах и возможность совмещения операций термической и газостатической обработки.

Ключевые слова: интерметаллид Ni₃Al, высокотемпературная газостатическая обработка, микроструктура, микропористость, блоки сопловых лопаток, сплав ВКНА, усталостные характеристики.

The influence of hot isostatic pressing on microstructure and mechanical properties intermetallic alloy VKNA-4

O.A. Bazyleva, L.I. Rassokhina, D.G. Nefedov, A.M. Rogalev

All-russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Radio str. 17, 105005, Moscow

The effect of hot isostatic pressing (HIP) on microstructure, microporosity and fatigue strength of Ni₃Al-based alloy VKNA-4 block of blade castings with polycrystalline structure was investigated. Hot isostatic processing significantly increases the fatigue strength due to reduction of casting pores.

Keywords: intermetallic Ni₃Al, high temperature gas isostatic pressing, microstructure, microporosity, block of blade castings, VKNA alloy, fatigue strength.

1. Введение

Повышение ресурса, тяги и снижение эмиссии вредных веществ перспективных двигателей как гражданских, так и самолетов военного назначения решаются за счет совершенствования конструкций ГТД и создания новых, а также совершенствования современных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов [1–5].

Конструкционные сплавы на основе интерметаллида Ni₃Al серий ВКНА (ВИАМ, конструкционный, никель-алюминиевый)/ВИН (ВИАМ, интерметаллидный никелевый), созданные в нашем институте для деталей горячего тракта ГТД, экономно легированы, обладают высокой термической стабильностью, пониженной плотностью и работоспособны до температуры 1200°C [6–10]. Ранее при исследовании влияния высокотемпературной обработки (ВГО) на структуру и микропористость заготовок и отливок из интерметаллидных сплавов на основе соединения Ni₃Al с поликристаллической структурой установлено, что происходит «залечивание» литейных дефектов и совершенствование структуры [11–15]. Это в свою очередь положительно сказывается на усталостных характеристиках, работоспособности и ресурсе де-

талей, изготовленных из интерметаллидных сплавов на основе никеля.

При опробовании и дальнейшем внедрении в серию интерметаллидного сплава ВКНА-4 в качестве блоков сопловых лопаток перспективного газотурбинного двигателя целью настоящих исследований является выявить возможность совмещения операций их термической и газостатической обработки.

2. Методика проведения исследований

В качестве объекта исследования использовали цилиндрические заготовки образцов с поликристаллической структурой диаметром $\varnothing 16$ мм и длиной $L=75$ мм и отливки блоков соплового аппарата 2-й ступени турбины высокого давления (ТВД) из сплава ВКНА-4 системы масс. %: Al–9,0; Cr –5,0; W–1,8; Mo–2,5; Co–7,0; Zr–1,2; C–0,18; Ni–ост.

Выплавку прутковых (шихтовых) заготовок исследуемого сплава проводили вакуумным индукционным (ВИ) методом, мерные шихтовые заготовки переплавляли методом точного литья по выплавляемым моделям на

вакуумных установках для равноосной кристаллизации.

Высокотемпературную газостатическую обработку заготовок образцов и отливок сопловых лопаток проводили в газостате «Quintus-16» фирмы ASEA (Швеция) ФГУП «ВИАМ», имеющем молибденовый двухзонный нагреватель (размеры горячей зоны $\varnothing 200 \times 600$ мм, максимальное рабочее давление 200 МПа). Для высокотемпературной обработки использовали керамическую оснастку (материал КМЦ). Внешний вид загруженной садки представлен на рис.1. Отливки блока сопловых лопаток и заготовок под образцы размещали без дополнительной оснастки.

Режим высокотемпературной обработки – нагрев до температуры $t_{\text{раб.}} = (t_s - 100)^\circ\text{C} - 2$ часа, $(t_s - 50)^\circ\text{C} - 2$ час, регламентированное охлаждение до температуры 800°C , рабочее давление 170–190 МПа. (t_s – температура начала плавления сплава), затем цилиндрические заготовки образцов и отливки сопловых лопаток охлаждались до комнатной температуры в выключенном газостате.

Исследование пористости до и после ВГО в пере и в полке отливок сопловых лопаток сплава ВКНА-4 проводили на нетравленых шлифах на металлографическом комплексе фирмы «Leica». Съемку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC-335 (3 мегапиксела), подготовку изображений к количественному анализу и их математическую обработку выполняли при помощи компьютерной программы Image Expert Pro 3х. Количественный анализ микропор на поверхности шлифов проводили путём исследования не менее 20 полей зрения для каждого образца при увеличении $\times 200$.

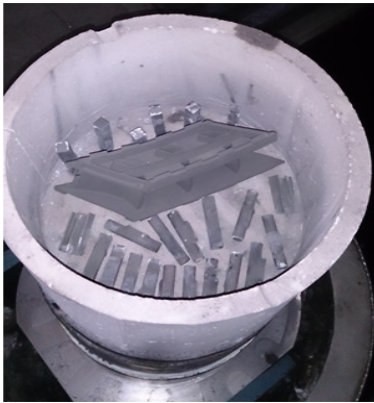


Рис. 1. Загрузка отливок блока сопловых лопаток и заготовок под образцы из сплава ВКНА-4 в газостат «Квинтус-16».

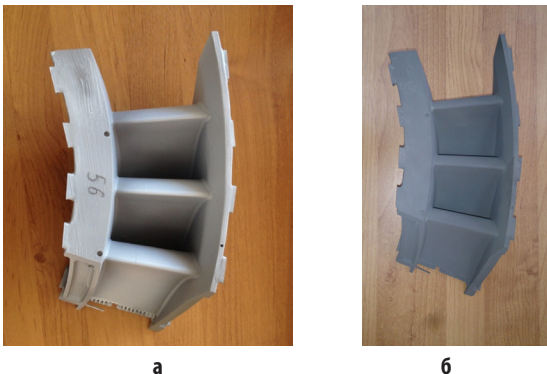


Рис. 2. Внешний вид отливки блока сопловых лопаток до (а) и после (б) газостатирования.

Изменение параметров микроструктуры (морфология γ' -фазы, форма и размер карбидной фазы, наличие литейных пор) образцов и отливок лопаток из сплава ВКНА-4 исследовали в литом состоянии и после высокотемпературной обработки на оптическом микроскопе Olympus GX-51.

Испытания на малоцикловую усталость проводили на установке PSB-10 в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Анализ внешнего вида, геометрии и микроструктуры заготовок под образцы и отливок блоков сопловых лопаток показал, что окраска отливок меняется, темнеет, по-видимому, из-за диффузии хрома на поверхность отливок в условиях вакуума (рис.2), геометрия, при выбранных режимах высокотемпературной обработки, – не меняется. Микроструктура интерметаллидного сплава в литом состоянии заготовок образцов и отливок лопаток представляет собой дендритно-ячеистую структуру и является характерной для никелевых интерметаллидных сплавов [16, 17]. В литом состоянии, присутствуют микропоры, расположенные на стыках дендрит–междендритное пространство, их количество в отливках, изготовленных по серийной технологии, значительно и составляет 0,06–0,07 % об. (рис.3а,б). В отливках блоков сопловых лопаток, полученных по разработанной технологии, среднее содержание микропор – 0,03–0,04 % об. (рис.4).

Оси дендритов состоят из смеси фаз γ' и γ (рис.5), в междендритных пространствах кристаллизуется карбидная фаза типа MeC и Me_7C_3 (Cr_7C_3) (рис.5а). Карбиды Cr_7C_3 в виде «китайских иероглифов» неравномерно располагаются в междендритных пространствах и занимают большую объемную долю по сравнению с карбидными частицами MeC (рис.5а,б), также частично междендритные пространства занимают глобулы γ' -фазы (рис.5а–г).

Анализ микроструктуры отливок блоков сопловых лопаток, прошедших высокотемпературную обработку, проводился в среднем поперечном сечении лопатки на спинке, корыте и средней части охлаждаемых лопаток и показал, что после газостатирования помимо вытягивания γ' -фазы (рис.5а,в) и появления пластинчатых карбидов типа Mo_2C (рис.5а,в,г) происходит процесс частичного залечивания пор, микропористость составляет ~ 0,02–0,03 % об. (рис.6).

Исследование сплава ВКНА-4 после термической обработки, совмещенной с ВГО показало, что микроструктура сплава приобрела вид рафт-структуры, границы зерен равномерно упрочнены выделениями карбидной фазы, происходит залечивание микропор (рис.3 и 6).

Уменьшение количества микропор и уплотнение структуры благоприятно сказалось на усталостных характеристиках сплава ВКНА-4 (рис.7). Установлено, что после проведения операции высокотемпературной обработки предел малоцикловой усталости образцов сплава ВКНА-4 на базе 1×10^4 ци-

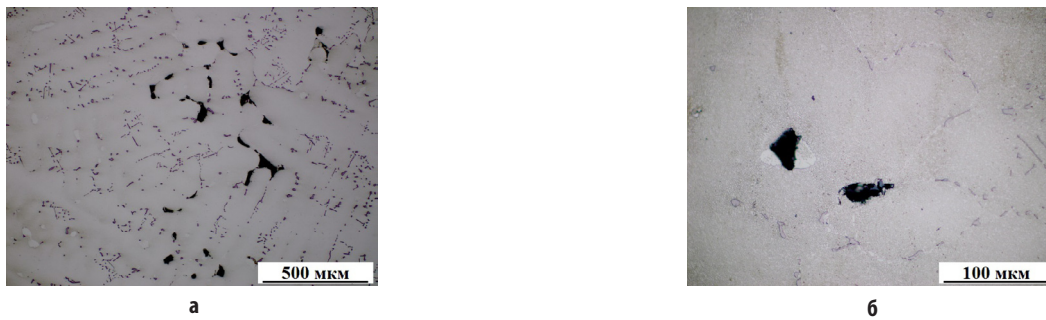


Рис. 3. Микроструктура отливки блока сопловых лопаток, залитого по серийной технологии



Рис. 4. Микроструктура отливки блока сопловых лопаток, залитого по новому технологическому режиму.

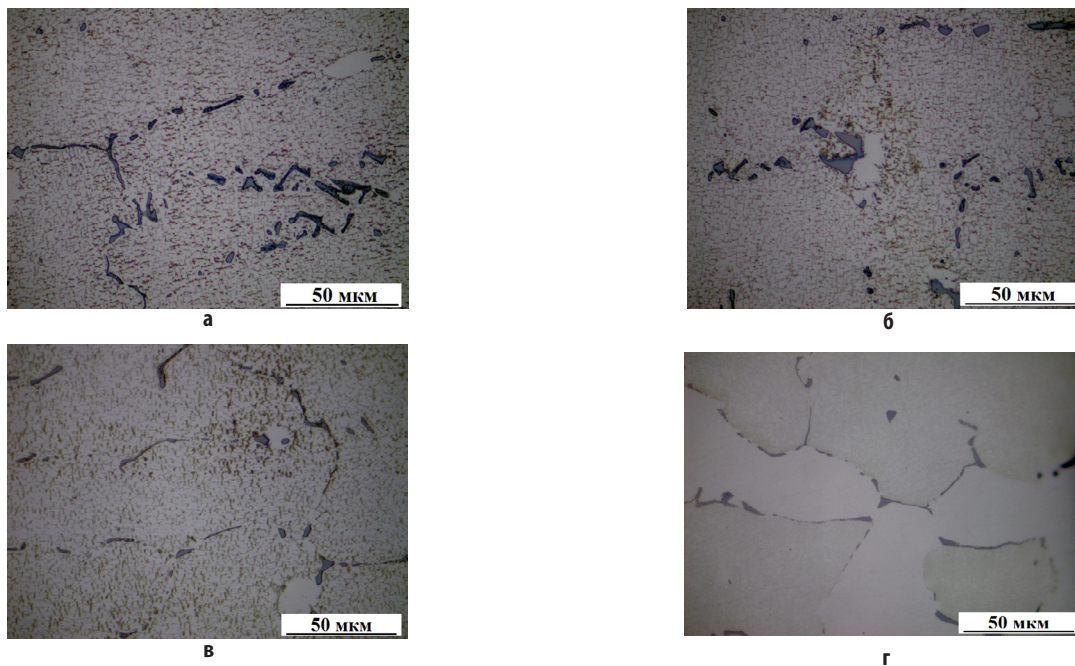


Рис. 5. Микроструктура сопловой лопатки, отлитой из сплава ВКНА-4.

клов при температуре испытания 850°C повышается на $\sim 8\%$ с 460 до 500 МПа, а при нагрузке 500 МПа количество циклов увеличивается в 2 раза и составляет 100070 циклов.

4. Выводы

Установлена возможность совмещения операций термической и газостатической обработки заготовок образцов и отливок сопловых лопаток из интерметаллидного сплава на основе Ni3Al с поликристаллической структурой ВКНА-4

Процент литейных микропор на отливках сопловых

лопаток, изготовленных по серийной технологии после проведения ГИП сократился с 0,06–0,07% об. до 0,02–0,03% об.

Проведение термической обработки заготовок, совмещённой с операцией высокотемпературной газостатической обработки, повышает предел малоциклового усталости образцов сплава ВКНА-4 на базе 1×10^4 циклов при температуре испытания 850°C \sim на 8% с 460 до 500 МПа, а при напряжении 500 МПа количество циклов увеличивается в 2 раза и составляет 100070 циклов.

Вследствие выше перечисленного можно прогнозировать увеличение ресурса и надёжности деталей горячего тракта двигателя.



Рис. 6. Распределение карбидов в сплаве ВКНА-4 после термической обработки, совмещенной с ВТО.

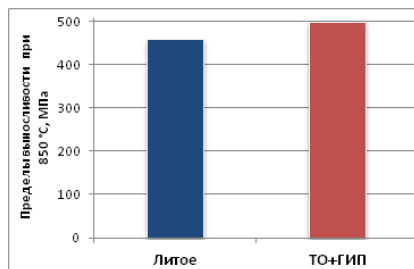


Рис. 7. Пределы выносливости по МЦУ сплава ВКНА-4.

Литература

- Ju. N. Shmotin, R. Ju. Starkov, D. V. Danilov, O. G. Ospennikova, B. S. Lomberg. *Aviacionnye materialy i tehnologii*. **2**, 6 (2012). (in Russian) [Ю.Н. Шмотин, Р.Ю. Старков, Д.В. Данилов, О.Г. Оспенникова, Б.С. Ломберг. *Авиационные материалы и технологии*. **2**, 6 (2012).]
- Ospennikova O. G. *Aviacionnye materialy i tehnologii*. **S**, 19 (2012). (in Russian) [Оспенникова О.Г. *Авиационные материалы и технологии*. **S**, 19 (2012).]
- E. N. Kablov, O. G. Ospennikova, O. A. Bazyleva. *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie»*. **2**, 13 (2011). (in Russian) [Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, О.А. Базылева. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. **2**, 13 (2011).]
- E. N. Kablov. *Metally Evrazii*. **3**, 10 (2012). (in Russian) [Е.Н. Каблов. *Металлы Евразии*. **3**, 10 (2012).]
- E. N. Kablov, Ju. A. Bondarenko, A. B. Echin, V. A. Surova. *Aviacionnye materialy i tehnologii*. **1**, 3 (2012). (in Russian) [Е.Н. Каблов, Ю.А. Бондаренко, А.Б. Ечин, В.А. Сурова. *Авиационные материалы и технологии*. **1**, 3 (2012).]
- O. A. Bazyleva, Je. G. Arginbaeva, E. Ju. Turenko. *Aviacionnye materialy i tehnologii*. **S**, 57 (2012). (in Russian) [О.А. Базылева, Э.Г. Аргинбаева, Е.Ю. Туренко. *Авиационные материалы и технологии*. **S**, 57 (2012).]
- O. A. Bazyleva, Je. G. Arginbaeva, E. Ju. Turenko. *Aviacionnye materialy i tehnologii*. **3**, 26 (2013). (in Russian) [О.А. Базылева, Э.Г. Аргинбаева, Е.Ю. Туренко. *Авиационные материалы и технологии*. **3**, 26 (2013).]
- E. N. Kablov, O. G. Ospennikova, O. A. Bazyleva. *Dvigatel'*. **4**, 24 (2010). (in Russian) [Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, О.А. Базылева. *Двигатель*. **4**, 24 (2010).]
- Splav na osnove intermetallida Ni³Al i izdelie, vypolnennoe iz nego: pat. 2256716 Ros. Federacija; opubl. 25.06.2004. (in Russian) [Сплав на основе интерметаллида Ni³Al и изделие, выполненное из него: пат. 2256716 Рос. Федерация; опубл. 25.06.2004.]
- Splav na osnove intermetallida Ni³Al i izdelie, vypolnennoe iz nego: pat. 2304179, Ros. Federacija; opubl. 05.05.2006. (in Russian) [Сплав на основе интерметаллида Ni³Al и изделие, выполненное из него: пат. 2304179, Рос. Федерация; опубл. 05.05.2006.]
- E. N. Kablov, M. R. Orlov, O. G. Ospennikova. *Aviacionnye materialy i tehnologii*. **S**, 117 (2012). (in Russian) [Е.Н. Каблов, М.Р. Орлов, О.Г. Оспенникова. *Авиационные материалы и технологии*. **S**, 117 (2012).]
- O. A. Bazyleva, Ju. A. Bondarenko, V. A. Kalicev, Je. G. Arginbaeva. *Litejnoe proizvodstvo*. **9**, 4 (2011). (in Russian) [О.А. Базылева, Ю.А. Бондаренко, В.А. Калицев, Э.Г. Аргинбаева. *Литейное производство*. **9**, 4 (2011).]
- A. G. Evgenov, O. A. Bazyleva, A. I. Shherbakov, V. I. Lukin. *Tehnologija mashinostroenija*. **12**, 37 (2011). (in Russian) [А.Г. Евгенов, О.А. Базылева, А.И. Щербаков, В.И. Лукин. *Технология машиностроения*. **12**, 37 (2011).]
- O. G. Ospennikova, V. A. Kalicev, A. G. Evgenov, O. A. Bazyleva. *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie»*. **2**, 88 (2011). (in Russian) [О.Г. Оспенникова, В.А. Калицев, А.Г. Евгенов, О.А. Базылева. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. **2**, 88 (2011).]
- Sposob obrabotki detalej iz splava na osnove nikelja: pat. 2451767 Ros. Federacija; opubl. 04.08.2010. (in Russian) [Способ обработки деталей из сплава на основе никеля: пат. 2451767 Рос. Федерация; опубл. 04.08.2010.]
- O. A. Bazyleva, Je. G. Arginbaeva, S. A. Golynece, A. B. Echin. *Metallurg*. **8**, 82 (2013). (in Russian) [О.А. Базылева, Э.Г. Аргинбаева, С.А. Голынец, А.Б. Ечин. *Металлург*. **8**, 82 (2013).]
- Struktura i svojstva intermetallidnyh materialov s nanofaznym uprochneniem /Pod nauch. red. E.N. Kablova i Ju.R. Kolobova. M.: MISiS. (2008) 172 p. (in Russian) [Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанозначным упрочнением /Под науч. ред. Е.Н. Каблова и Ю.Р. Колобова. М.: МИСиС. (2008) 172 с.]
- Litye lopatki gazoturbinnyh dvigatelej: splavy, tehnologii, pokrytija. Pod obshh. red. E.N. Kablova. 2-e izd. M.: Nauka. (2006) 632 p. (in Russian) [Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. Под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука. (2006) 632 с.]
- Ospennikova O. G., Poklad V. A., Monastyrskaja E. V. *Litejnoe proizvodstvo*. **8**, 37 (2007). (in Russian) [О.Г. Оспенникова, В.А. Поклад, Е.В. Монастырская. *Литейное производство*. **8**, 37 (2007).]