

Рис. 4. Микроструктура (а – $\times 100$, б – $\times 10000$) сплава ВЖ171

термической обработки он упрочняется частицами нитридов титана, в том числе и наноразмерными, которые стабильны вплоть до температуры плавления сплава (рис. 4). Максимальная рабочая температура сплава ВЖ171 составляет 1250°C , что выше на $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$, чем у серийных материалов аналогичного применения. При температурах до 1100°C его жаропрочность выше в 3–4 раза.

За последние годы в ВИАМ разработаны технологии производства листов из сплава ВЖ171 и химико-термической обработки деталей. Проведено опробование технологий производства жаровых труб камер сгорания для трех видов малоразмерных ГТД на серийном оборудовании НПЦ газотурбостроения «Салют», КОБМ (г. Калуга) и НПП «Аэросила» (г. Ступино). В составе одного из двигателей сплав успешно прошел эксплуатационные испытания.

Для элементов сопряжения компрессора (с рабочей температурой до 600°C) разработан высокопрочный листовая свариваемый сплав на никель-железокобальтовой основе марки ВЖ176 с прочностью: $\sigma_{\text{в}} = 1400$ МПа, $\sigma_{100}^{600^{\circ}} = 950$ МПа. Оптимизированы технологии его получения, сварки и термической обработки. В интервале температур $20\text{--}600^{\circ}\text{C}$ сплав ВЖ176 превосходит серийные сплавы: ЭП718 (отечественный) и In907 (зарубежный) по прочности – на $10\text{--}25\%$ и жаропрочности – на $15\text{--}20\%$. Сплав ВЖ176 обладает низким температурным коэффициентом линейного расширения ($\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне температур $20\text{--}600^{\circ}\text{C}$).

О.А. БАЗЫЛЕВА, Э.Г. АРГИНБАЕВА, Е.Ю. ТУРЕНКО

ЖАРОПРОЧНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ СПЛАВЫ

С целью повышения температуры газа перед турбиной и, как следствие, КПД двигателя создан новый класс литейных конструкционных высокотемпературных экономнолегированных материалов на основе интерметаллида Ni_3Al серии ВКНА (ВИАМ, конструкционный никель-алюминиевый), предназначенных для изготовления деталей газотурбинных двигателей, эксплуатируемых в диапазоне температур $900\text{--}1200^{\circ}\text{C}$.

Анализируя параметры механических свойств, длительной прочности и пределов усталости при создании интерметаллидных сплавов серии

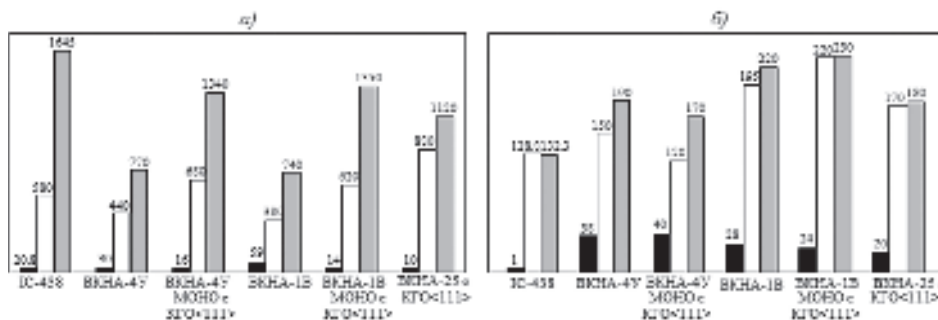


Рис. 1. Механические свойства интерметаллидных сплавов при температуре 20 (а) и 1200°С (б):
 ■ – предел прочности при растяжении, МПа; ■ – предел текучести, МПа; □ – относительное удлинение, %

ВКНА и сравнивая их с зарубежным аналогом, наблюдается тенденция повышения этих характеристик (рис. 1 и 2).

Сплав ВКНА-25 (ВИН1 – ВИАМ, интерметаллидный никелевый) является наиболее жаропрочным среди интерметаллидных сплавов. При монокристаллической структуре и кристаллографической ориентации [111] его жаропрочность при 1100°С на базе 100 ч составляет не менее 130 МПа. При плотности $d \leq 8105 \text{ кг/м}^3$ сплав ВКНА-25 превосходит по удельной длительной прочности серийно применяемые сплавы-аналоги ЖС32 (Россия) и IC-6 (США).

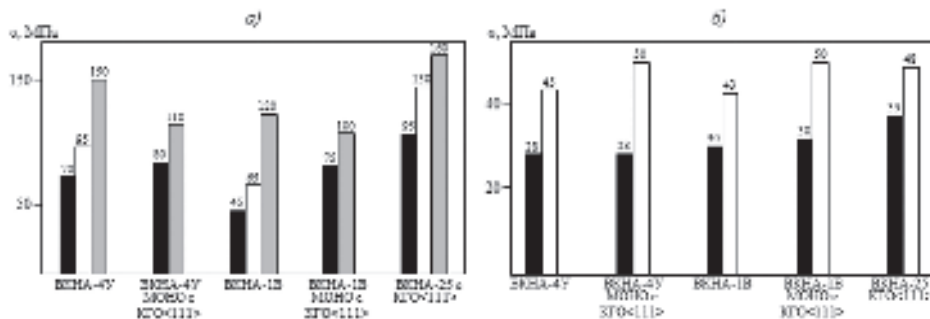


Рис. 2. Предел усталости σ_{-1} (■) на базе $2 \cdot 10^7$ цикл и длительная прочность σ_{100} (□), σ_{500} (■) интерметаллидных сплавов при температуре 1100 (а) и 1200°С (б)

За последние 5 лет в подразделении проведены подробные исследования сплава ВКНА-25 с кристаллографическими ориентациями [001], [011], [111]. Определены механические и теплофизические характеристики. На опытно-промышленных партиях образцов проведены квалификационные испытания. С целью применения сплава для семейства перспективных двигателей ПД-14 БСМС, определена кратковременная прочность в интервале температур 20–1000°С, жаропрочность при 900 и 1000°С и рассчитаны средние и минимальные (на уровне -3σ) значения свойств. Типичная структура сплава представлена на рис. 3.

Научно-исследовательские работы ведутся в направлении дальнейшего совершенствования составов интерметаллидных материалов серии ВКНА на основе интерметаллида Ni_3Al . Для монокристаллического литья методом высокоградиентной кристаллизации разработан новый сплав ВКНА-1ВУ с КГО [111], с плотностью $d \leq 8000 \text{ кг/м}^3$ и следующими характеристиками: $\sigma_{100}^{1200^\circ} = 50\text{--}60 \text{ МПа}$, $\sigma_{100}^{1100^\circ} = 125\text{--}130 \text{ МПа}$, $\sigma_{100}^{1000^\circ} \geq 150 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{в}}^{1300^\circ} = 80\text{--}100 \text{ МПа}$.

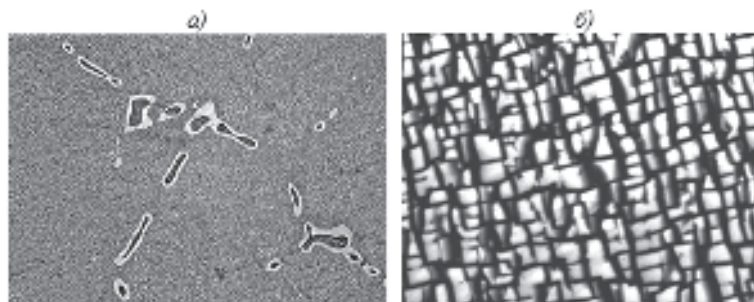


Рис. 3. Микроструктура (а – $\times 500$; б – $\times 10000$) отливки лопатки из сплава ВКНА-25

Одновременно сотрудники лаборатории разрабатывают технологию отливки интерметаллидных сплавов и деталей из них. Для сплава ВКНА-1ВУ осуществляется выплавка шихтовой заготовки и изготовление на установке УВНЭС-5 отливок сопловых лопаток с монокристаллической структурой с КГО [111]; для сплава ВКНА-1В – литье методом высокоградиентной направленной кристаллизации тонкостенных сегментов с внутренними каналами охлаждения; для сплава ВКНА-25 – изготовление отливок лопаток, створок и модельных проставок с направленной и монокристаллической структурами; для сплава ВКНА-4УР – литье деталей соплового аппарата для двигателей различного назначения (рис. 4).

Проведено технологическое опробование сплавов ВКНА-25 и ВКНА-4УР в составе малоразмерного двигателя МД-120 во ФГУП НПП газотурбостроения «Салют», эксплуатационное опробование сплава ВКНА-1В в качестве сегментов камеры сгорания в условиях ОАО «УМПО» (г. Уфа).



Рис. 4. Створки сопла из интерметаллидного сплава ВКНА-4УР

Для ускорения внедрения интерметаллидных сплавов в производство выпущены комплекты государственных стандартных образцов (ГСО) со-

ставов сплавов ВКНА-4У, ВКНА-1В и ВКНА-25. Применение стандартных образцов для спектрального анализа позволит снизить в 10–15 раз трудоемкость определения химического состава.

В настоящее время разработка интерметаллидных сплавов ведется по двум основным направлениям: повышение жаропрочности и сопротивления термоусталости. Сплав ВИН2 с КГО [111] обеспечивает более высокую длительную прочность при температуре 1100°C. В связи с уменьшенным в ~2 раза модулем упругости, сплав ВИН4 с КГО [001] и характеристиками жаропрочности при 1200°C на уровне сплава ВКНА-1В с КГО [111] имеет повышенное сопротивление термической усталости, что обеспечивает более высокую надежность авиационных ГТД и увеличение на 20–30% ресурса сопловых лопаток.

Актуальной задачей является поиск состава сплава на основе интерметаллида NiAl с рабочими температурами до 1350°C, но это затруднено тем, что соединение NiAl чрезвычайно хрупкое. В последние годы подобрана система легирования, при которой сплав на основе NiAl имеет пластичность при комнатной температуре не менее 3% и плотность не выше 7200 кг/м³.

В результате исследований за последние 5 лет разработаны 20 научно-технических документов: дополнительные сведения и дополнения к паспортам, технологические рекомендации и инструкции, технические условия; оформлено 4 патента на изобретения. В рамках контракта с КНР «Новая эра» ведется работа по передаче лицензии на технологию производства сплава ВКНА-4У и отливок деталей из него. Для итальянской фирмы «AVIO» по контракту «Инновационные интерметаллидные материалы для деталей турбины высокого давления» разработаны два сплава с монокристаллической и направленной столбчатой структурами с длительной прочностью на базе 100 ч при температуре 1000°C соответственно 250 и 140 МПа. Будут продолжены работы по определению комплекса физико-механических и коррозионных свойств.

Интерметаллидные материалы на основе соединений Ni₃Al представляют интерес в качестве материала для деталей камеры сгорания с рабочей температурой до 1300°C, турбины – в качестве сопловых охлаждаемых лопаток, створок регулируемого сопла, проставок с рабочей температурой до 1200°C.

Применение интерметаллидных материалов с низкой плотностью типа ВКНА позволит снизить массу деталей на 10–15%, повысить рабочую температуру на 150–200°C и увеличить срок службы деталей в 1,5–2 раза, а также снизить стоимость шихтовой заготовки и трудоемкость изготовления по сравнению с никелевыми аналогами.

Е.Н. КАБЛОВ, С.А. МУБОЯДЖЯН

ЖАРОСТОЙКИЕ И ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГТД

К началу 80-х годов прошлого века были созданы первые двигатели 4-го поколения РД-33 и АЛ-31 для самолетов МиГ-29 и Су-27. Испытания двигателей показали, что порошковое алитирование рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) не обеспечивает их защиту, ресурс двигателя ограничивался 50 ч, что было связано с повышением на