

Рис. 8. Результат рентгеноскопического контроля алюминиевых отливок толщиной 5 мм при 10-кратном увеличении изображения:

1–5 – первый, второй, третий, четвертый и пятый балл пористости соответственно

Наиболее часто отбраковочным баллом пористости для алюминиевых отливок является 3-й. Поэтому с помощью микрорентгеноскопии появилась возможность значительно быстрее и дешевле определять, например, в партии произведенных отливок те, у которых балл пористости выше 3-го. Если же необходимо определить, например, 1-й балл пористости, то и тут микрорентгеноскопия может значительно снизить издержки также путем предварительного отбраковывания отливок с баллом пористости выше 3-го. А уже 1-й балл можно определить и с помощью рентгенографии.

Таким образом, в результате проведенной работы:

- установлена возможность определения балла газовой пористости для отливок из алюминиевых литейных сплавов типа силумин (системы Al–Si);
- определено необходимое увеличение изображения для стабильного определения балла газовой пористости;
- создана шкала газовой пористости для отливок из алюминиевых литейных сплавов типа силумин (системы Al–Si) для широкого диапазона толщин (от 5 до 25 мм) – с 10-кратным увеличением изображения.

Результаты проведенной работы могут быть основой для исследования возможности обнаружения макро-и микродефектов легких сплавов, неметаллических или композиционных материалов средствами как радиоскопии, так и микрорадиоскопии, что будет способствовать значительной экономии материального и трудового ресурсов.

*О.А. Базылева, В.П. Бунтушкин, О.Б. Тимофеева,
Г.И. Морозова, М.А. Воронцов*

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВКНА-1В ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВОВ И ИСПЫТАНИЙ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Литейный жаропрочный сплав ВКНА-1В на основе легированного интерметаллида Ni_3Al в системе Ni–Al–Cr–Mo–Ti–W разработан, паспортизован и рекомендуется для деталей горячего тракта ГТД, длительно эксплуатируемых при температурах до $1250^{\circ}C$ с забросами (≤ 10 ч) до $1300^{\circ}C$. Особенностью сплава является низкая плотность (7938 кг/м^3), высокое сопротивление окислению при температуре до $1300^{\circ}C$ (привес при окислении на воздухе за 100 ч при температуре $1250^{\circ}C$ не превышает 25 г/м^2). Материал жаропрочен при температурах 1200 и $1250^{\circ}C$. Сто часовая прочность сплава при этих температурах равна 43 и 13 МПа соответственно. Это позволяет рассматривать сплав ВКНА-1В в качестве базовой композиции при создании более жаропрочных материалов с рабочими температурами до $1250^{\circ}C$.

В работе исследована микроструктура и фазовый состав сплава ВКНА-1В после высокотемпературных нагревов и испытаний на длительную прочность. Цель исследования заключалась в установлении максимальной температуры эксплуатации и выборе путей повышения жаропрочности сплава ВКНА-1В.

Объектами исследований являлись прутки, отлитые из сплава ВКНА-1В паспортного состава, а также прутки, отлитые из сплава ВКНА-1В, дополнительно легированного тугоплавкими элементами, – в обоих случаях прутки были отлиты методом направленной кристаллизации. Микроструктуру сплавов исследовали в исходном литом состоянии, после нагревов при температурах 1200, 1250 и 1300°C (выдержка 100, 250 и 10 ч соответственно), а также после испытания на длительную прочность в воздушной среде при температуре 1200°C и растягивающем напряжении 30 МПа.

Микроструктура сплава ВКНА-1В в исходном состоянии имеет ячеисто-дендритное строение, в междендритных участках расположены крупные частицы псевдоэвтектической γ' -фазы (рис. 1, а), частицы вторичной интерметаллидной γ' -фазы окружены тонкими прослойками γ -твердого раствора, в осях дендритов они более мелкие и имеют кубическую (для ориентации $\langle 001 \rangle$) форму (рис. 1, б).

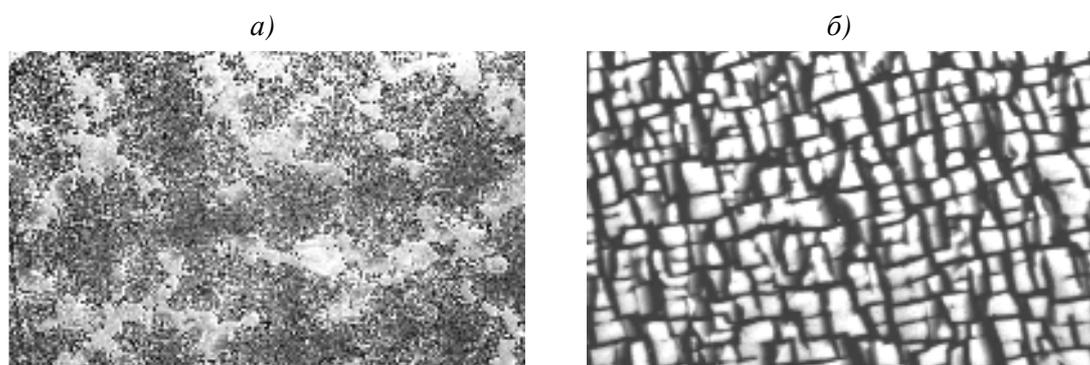


Рис. 1. Микроструктура сплава ВКНА-1В в исходном (литом) состоянии:
а – $\times 250$; б – $\times 10000$

Анализ микроструктуры сплава ВКНА-1В после воздействия температур 1200, 1250 и 1300°C с последующим охлаждением на воздухе показал, что нагрев при температуре 1200°C в течение 100 ч не приводит к существенным изменениям структуры сплава (сравнить рис. 2, а и 2, б). В структуре сплава под воздействием температур 1250 и 1300°C происходят следующие изменения: частичное растворение γ' -фазы (в первую очередь в областях, окружающих псевдоэвтектику), уширение прослоек γ -твердого раствора, затем распад пересыщенного твердого раствора и выделение в нем высокодисперсной фракции γ' -фазы. Все указанные изменения усиливаются с повышением температуры до 1300°C (рис. 2, в, г). Из приведенных данных видно, что после отжига при температуре 1250°C структурные изменения связаны в основном с процессами, происходящими в прослойках γ -твердого раствора. Увеличение количества γ -твердого раствора, уменьшение его стабильности и выделение в нем высокодисперсной фракции γ' -фазы после отжигов при 1250–1300°C разупрочняет сплав и является причиной снижения времени до разрушения в процессе испытаний на длительную прочность. В связи с вышесказанным сплав рекомендован к применению в литом виде с отжигом для снятия литейных напряжений при температуре 1150°C в течение 1 ч или при 1000°C, 4 ч.

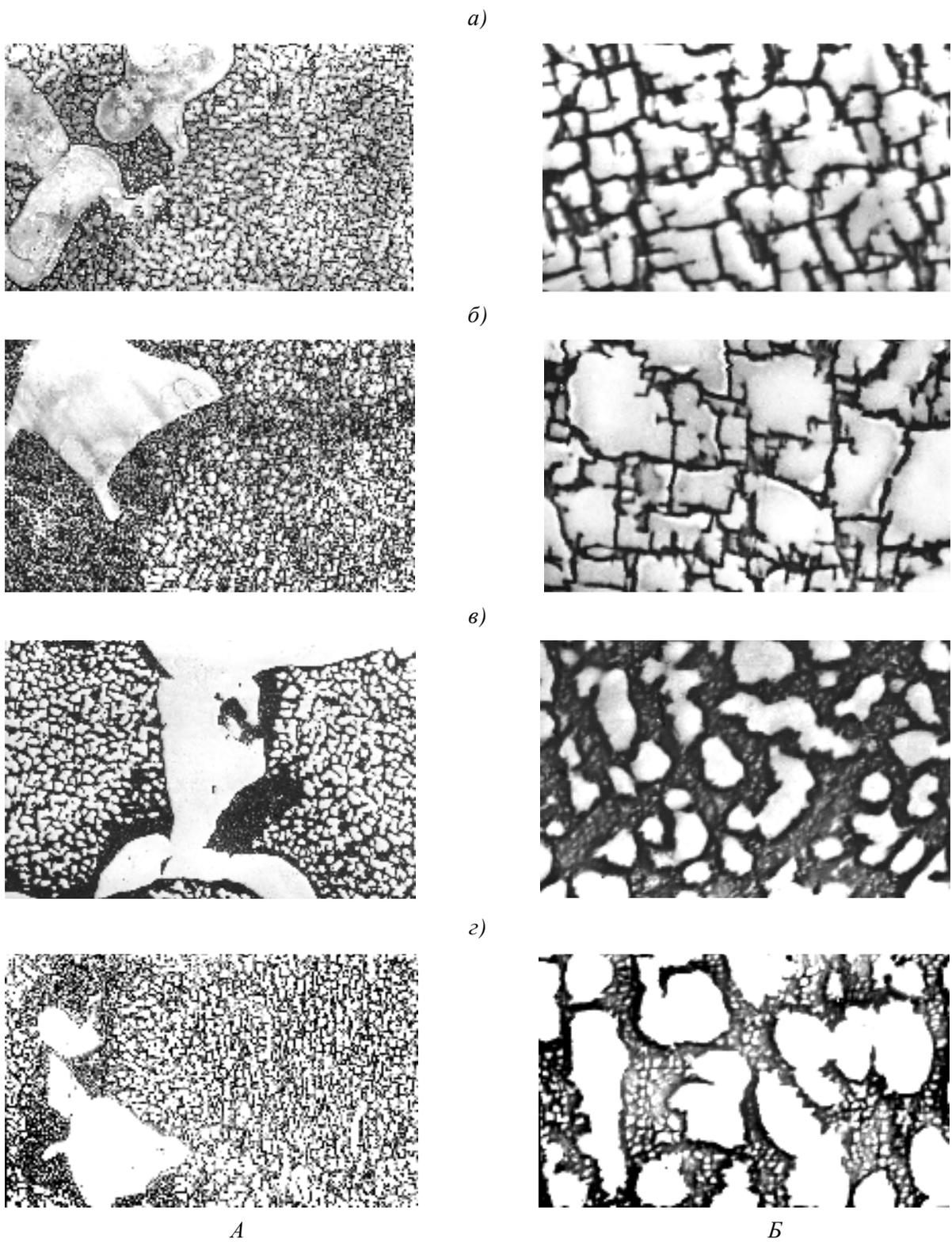


Рис. 2. Микроструктура сплава ВКНА-1В в исходном состоянии (а) и после нагревов при 1200°С, 100 ч (б); 1250°С, 250 ч (в); 1300°С, 10 ч (г):
A – $\times 1000$; *B* – $\times 10000$

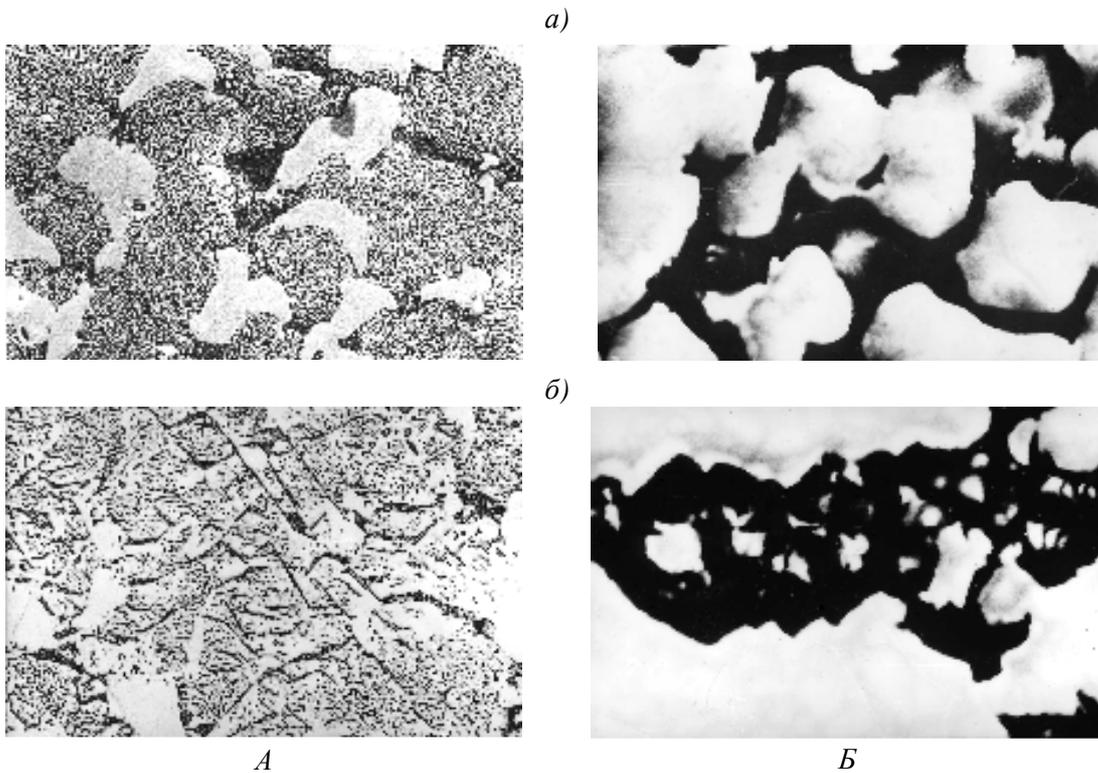


Рис. 3. Микроструктура (*A* – $\times 250$; *B* – $\times 10000$) сплава ВКНА-1В Моно после испытаний на длительную прочность ($T=1200^{\circ}\text{C}$, $\sigma=30$ МПа и $\tau=517$ ч):
a – головка образца; *b* – рабочая часть образца

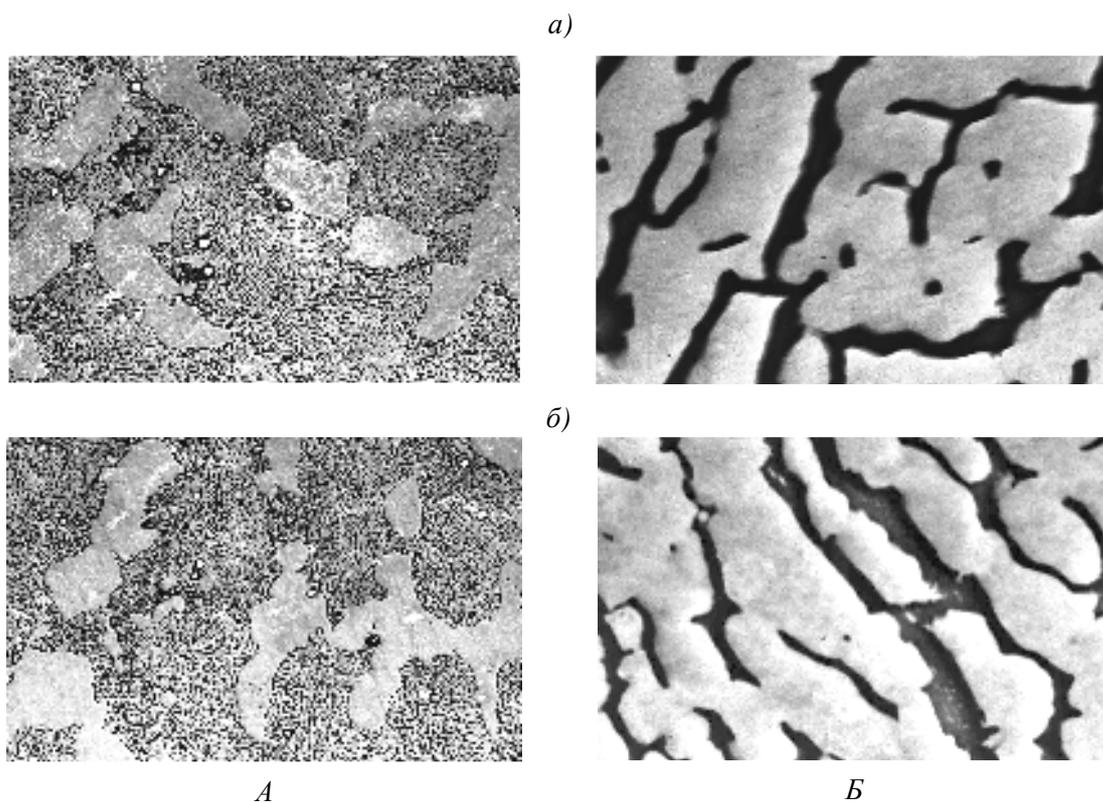


Рис. 4. Микроструктура (*A* – $\times 500$; *B* – $\times 10000$) сплава ВКНА-1ВУ Моно после испытаний на длительную прочность ($T=1200^{\circ}\text{C}$, $\sigma=30$ МПа и $\tau=647$ ч):
a – головка образца; *b* – рабочая часть образца

Таким образом, в результате проведенного исследования получены эталонные микроструктуры, позволяющие оценить температуры эксплуатации деталей из сплава ВКНА-1В.

Далее с целью выбора путей повышения жаропрочности сплава ВКНА-1В провели сравнительное исследование образцов паспортного состава и образцов с дополнительным легированием тугоплавкими элементами после испытаний на длительную прочность. Для повышения фазовой стабильности в сплав ввели тантал, который является γ' -образующим элементом, а для упрочнения твердого раствора – рений, который преимущественно растворяется в γ -фазе (по 0,5% по массе каждого). Сплав с такой композицией назван ВКНА-1ВУ.

Образцы обоих составов испытали в одинаковых условиях при температуре 1200°C и напряжении 30 МПа. Оказалось, что время до разрушения образцов с добавками рения и тантала по сравнению с аналогичным параметром исходного сплава увеличивается на ~25–30%.

Исследование микроструктуры образцов после испытаний на длительную прочность показало, что в головке и рабочей части образцов под воздействием высокой температуры происходит сращивание, огрубление и частичное растворение частиц γ' -фазы (рис. 3 и 4). В рабочей части образцов прослойки твердого раствора становятся шире, в них выделяются частицы высокодисперсной фракции γ' -фазы, приложенная нагрузка приводит к вытягиванию частиц γ' -фазы и образованию так называемой рафт-структуры (рис. 3, б и 4, б).

Однако при одинаковых условиях испытания структурные изменения, происшедшие в сплаве паспортного состава, выражены сильнее: больше ширина прослоек твердого раствора и количества вторичных выделений в них, значительно огрублена γ' -фаза, в рабочей части образца появляются избыточные ТПУ фазы (см. рис. 3).

Анализ результатов микроструктурного исследования показал, что дополнительное легирование сплава ВКНА-1В микродобавками тантала и рения повышает структурную стабильность как твердого раствора, так и интерметаллидной γ' -фазы и, как следствие, увеличивает долговечность сплава при испытаниях на длительную прочность при 1200°C.

Таким образом, в результате проведенной работы:

- показано, что максимальная температура эксплуатации сплава ВКНА-1В, при которой сохраняется стабильность его структуры, составляет 1200°C;
- показано, что дополнительное легирование сплава ВКНА-1В (сплав ВКНА-1ВУ) танталом и рением стабилизирует основные структурные составляющие сплава, повышая тем самым его долговечность при испытании на длительную прочность (при 1200°C и 30 МПа) на 25%;
- получены эталонные микроструктуры сплава ВКНА-1В, которые позволяют определить температуру эксплуатации деталей.