

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 ( $\leq 10$  ч) до  $1300^{\circ}C$ . Особенностью сплава является низкая плотность ( $7938 \text{ кг/м}^3$ ), высокое сопротивление окислению при температуре до  $1300^{\circ}C$  (привес при окислении на воздухе за 100 ч при температуре  $1250^{\circ}C$  не превышает  $25 \text{ г/м}^2$ ). 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  $\gamma'$ -фазы (рис. 1, а), частицы вторичной интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы окружены тонкими прослойками  $\gamma$ -твердого раствора, в осях дендритов они более мелкие и имеют кубическую (для ориентации  $\langle 001 \rangle$ ) форму (рис. 1, б).

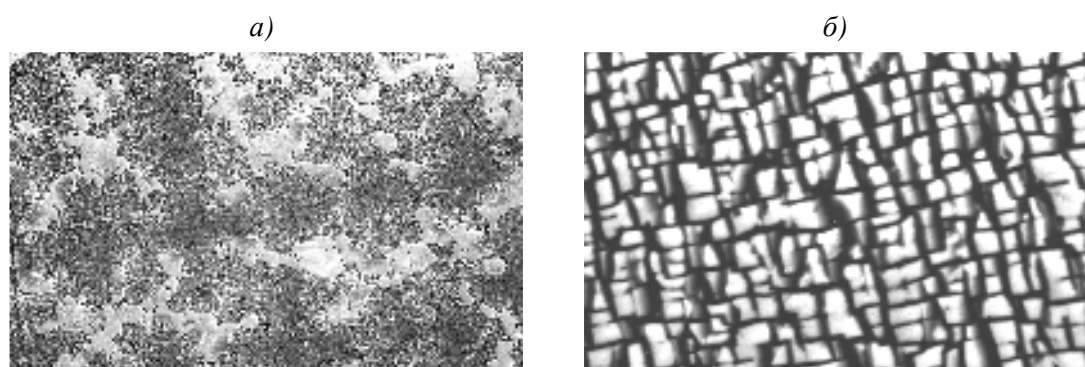


Рис. 1. Микроструктура сплава ВКНА-1В в исходном (литом) состоянии:  
а –  $\times 250$ ; б –  $\times 10000$

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  $\gamma'$ -фазы (в первую очередь в областях, окружающих псевдоэвтектику), уширение прослоек  $\gamma$ -твердого раствора, затем распад пересыщенного твердого раствора и выделение в нем высокодисперсной фракции  $\gamma'$ -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  $\gamma$ -твердого раствора. Увеличение количества  $\gamma$ -твердого раствора, уменьшение его стабильности и выделение в нем высокодисперсной фракции  $\gamma'$ -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.

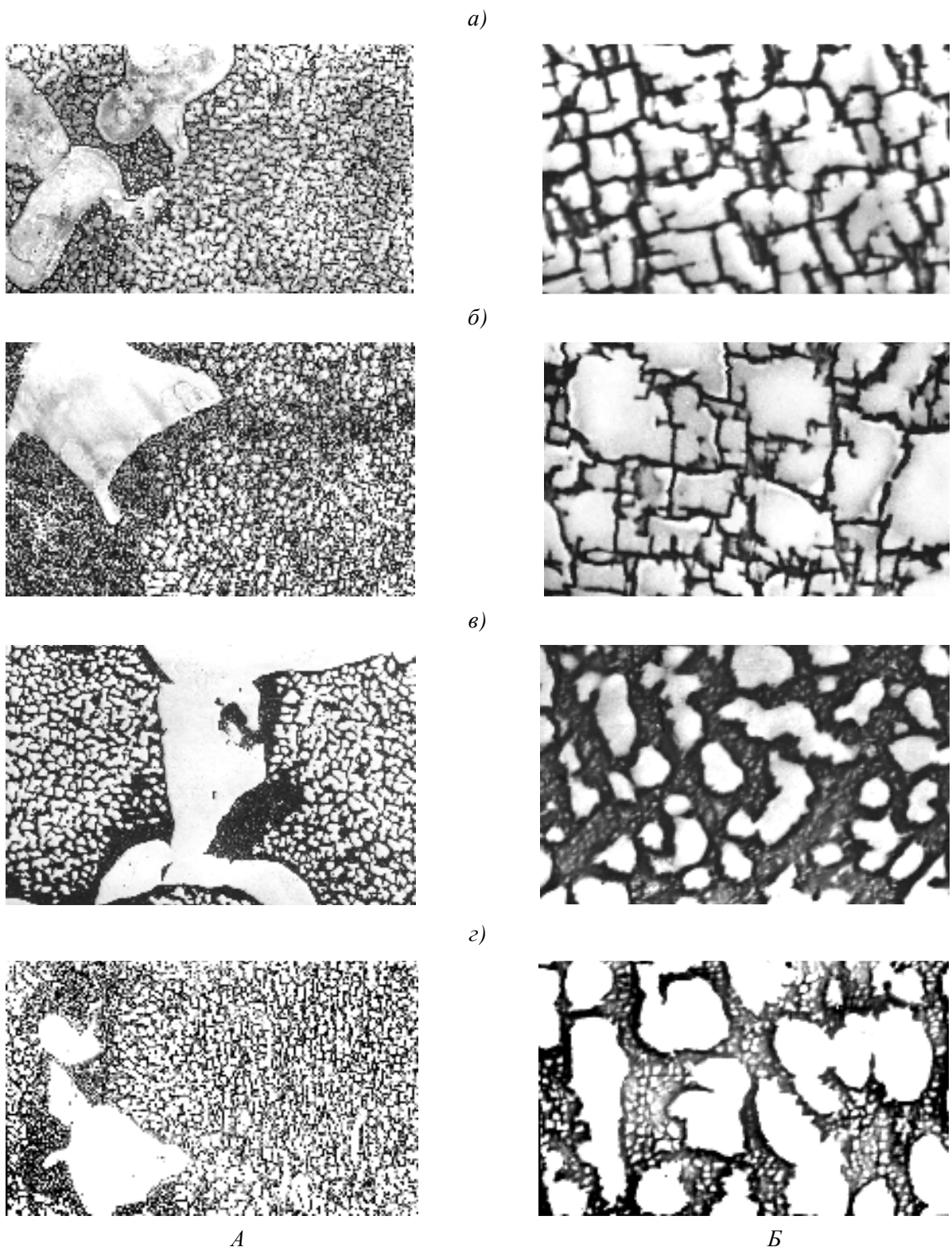


Рис. 2. Микроструктура сплава ВКНА-1В в исходном состоянии (а) и после нагревов при 1200°С, 100 ч (б); 1250°С, 250 ч (в); 1300°С, 10 ч (г):  
*A* –  $\times 1000$ ; *B* –  $\times 10000$

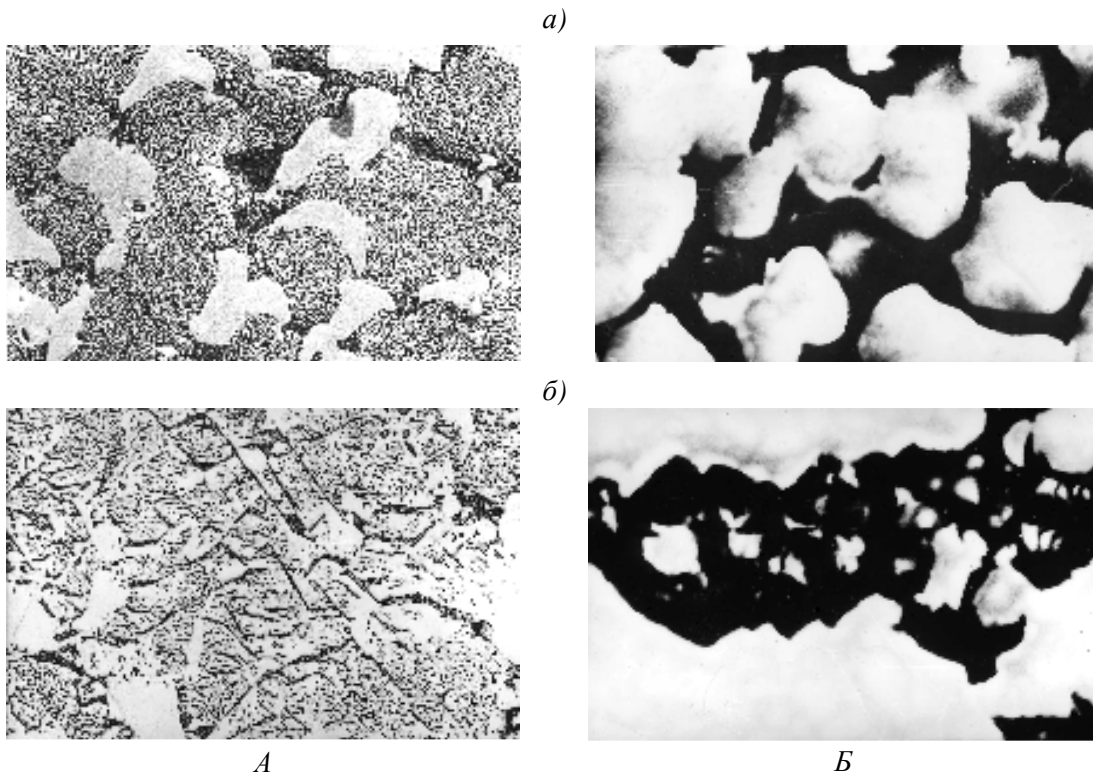


Рис. 3. Микроструктура (*A* –  $\times 250$ ; *B* –  $\times 10000$ ) сплава ВКНА-1В Моно после испытаний на длительную прочность ( $T=1200^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma=30$  МПа и  $\tau=517$  ч):  
*a* – головка образца; *b* – рабочая часть образца

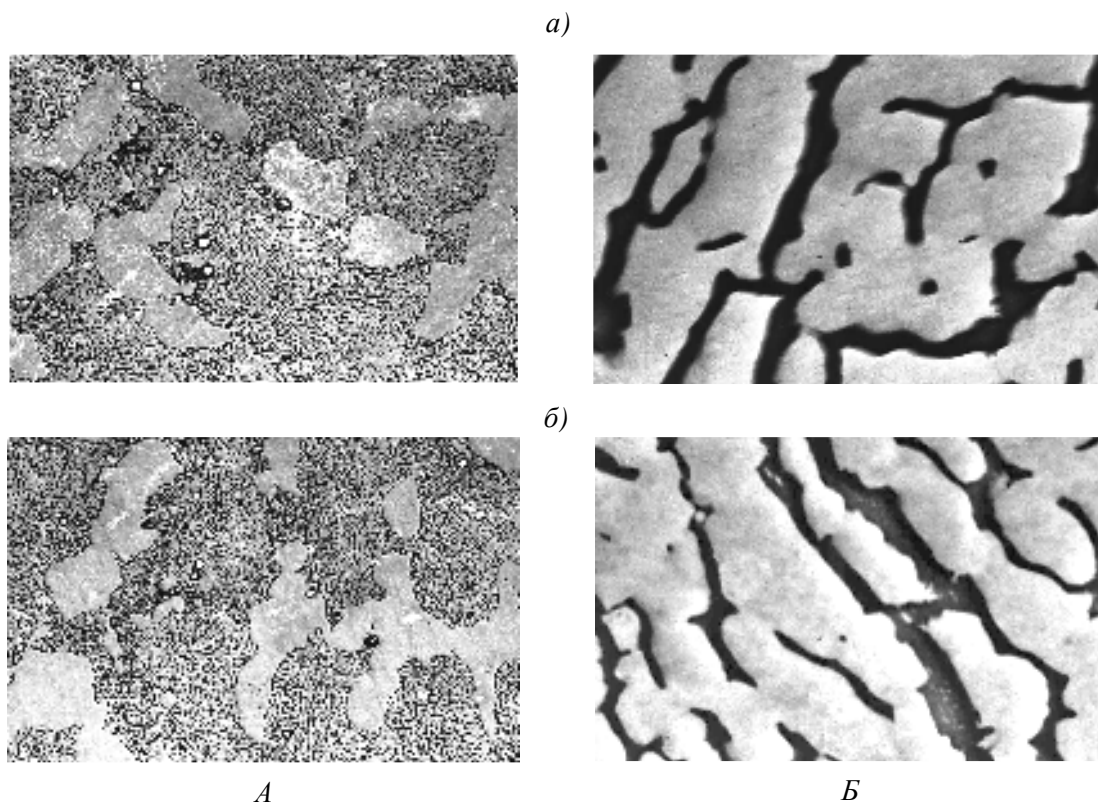


Рис. 4. Микроструктура (*A* –  $\times 500$ ; *B* –  $\times 10000$ ) сплава ВКНА-1ВУ Моно после испытаний на длительную прочность ( $T=1200^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma=30$  МПа и  $\tau=647$  ч):  
*a* – головка образца; *b* – рабочая часть образца

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  $\gamma'$ -образующим элементом, а для упрочнения твердого раствора – рений, который преимущественно растворяется в  $\gamma$ -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  $\gamma'$ -фазы (рис. 3 и 4). В рабочей части образцов прослойки твердого раствора становятся шире, в них выделяются частицы высокодисперсной фракции  $\gamma'$ -фазы, приложенная нагрузка приводит к вытягиванию частиц  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -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.