



УДК 621.746

Поступила 04.02.2014

А. С. КАЛИНИЧЕНКО, В. А. КАЛИНИЧЕНКО, В. С. НИСС, С. В. ГРИГОРЬЕВ, БНТУ

## СТАБИЛЬНОСТЬ МИКРОСТРУКТУРЫ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Проведенные исследования длительной стабильности микроструктур быстрозакаленных лент из сплавов алюминия с медью и хромом показали, что в медьсодержащих сплавах наблюдается естественное старение, сопровождаемое выделением стабильных фаз. В хромсодержащих быстрозакаленных лентах заметных изменений микроструктуры не наблюдается, что подтверждает их высокую временную стабильность.*

*The conducted researches of continuous stability of microstructures of the fast-quenched tapes from alloys of aluminum and chrome showed that the natural aging accompanied by discharge of stable phases is observed in copper-bearing alloys. There are no changes in microstructure in the chrome-bearing fast-chilled tapes that confirms their high temporary stability.*

**Введение.** Тенденции развития материаловедения характеризуются исследованиями и разработкой новых материалов с повышенными эксплуатационными свойствами, обеспечивающих повышение долговечности машин и механизмов, снижение материалоемкости продукции. Особый интерес представляют алюминиевые сплавы, которые характеризуются высокими удельными физико-механическими свойствами, однако работающие при относительно невысокой температуре. Для повышения их температурной области применения активно используется легирование тугоплавкими элементами. Необходимо отметить, что возможности полезного легирования в традиционных процессах литья почти себя исчерпали. Поэтому значительный интерес представляют процессы затвердевания при неравновесных условиях, которые открывают новые возможности в управлении структурой и свойствами металлов [1].

Причем процессы неравновесного затвердевания уже нашли практическое применение для некоторых алюминиевых сплавов [2]. Процессы местного плавления и затвердевания в крайне неравновесных условиях имеют место и при сверхглубоком проникновении, вызывая формирование совершенно необычных фаз и соединений [3]. Местные отклонения от равновесного хода процесса кристаллизации и последующего затвердевания зафиксированы при получении макрогетерогенных композиционных материалов [4].

**Исследование стабильности микроструктур.** С точки зрения получения в структуре нано-

размерных элементов интерес представляют термические методы, включающие в себя обработку с использованием источников концентрированной энергии (лазер, электронно-лучевая обработка) и процессы закалки из жидкого состояния. В процессах закалки из жидкого состояния обеспечиваются условия для расширения области растворимости в твердом состоянии, формирования ультрадисперсной структуры, формирования новых кристаллических и некристаллических, метастабильных фаз, включая фиксирование аморфного состояния. При последующей термообработке происходит распад пересыщенного твердого раствора или кристаллизация аморфного состояния с выделением по границам зерен наноразмерных фазовых составляющих. Такие частицы на границах зерен обеспечивают значительное увеличение стабильности микроструктур при повышенной температуре (рис. 1).

Ранее были выполнены исследования по особенностям формирования микроструктуры алюминиевых сплавов, полученных закалкой из жидкого состояния, а также определены некоторые физико-механические свойства [5]. При оценке работоспособности алюминиевых сплавов, полученных закалкой из жидкого состояния, важной задачей является исследование способности сохранять характер микроструктуры длительное время, что, в свою очередь, определяет и сохранение высоких физико-механических свойств. Поэтому были исследованы структуры образцов из алюминиевых сплавов, полученные закалкой из жидкого состояния

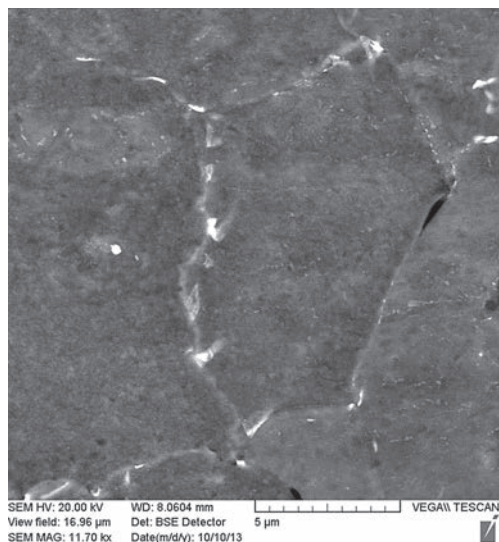


Рис. 1. Выделения фаз по границам зерна в быстрозакаленной ленте из сплава Al-5Cu

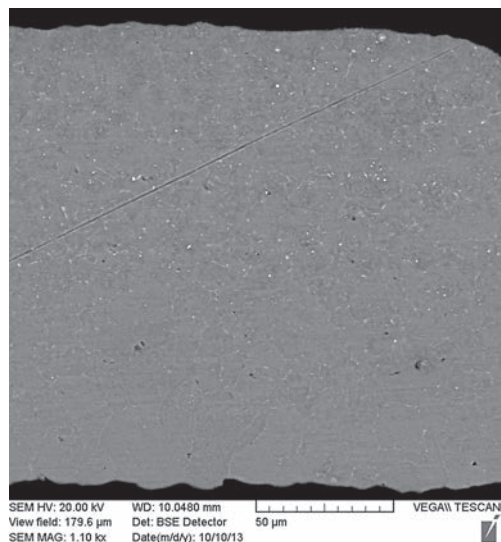


Рис. 2. Микроструктура сплава Al-5Cu

ранее (более 5 лет назад). Были исследованы сплавы системы алюминий – медь и алюминий – хром.

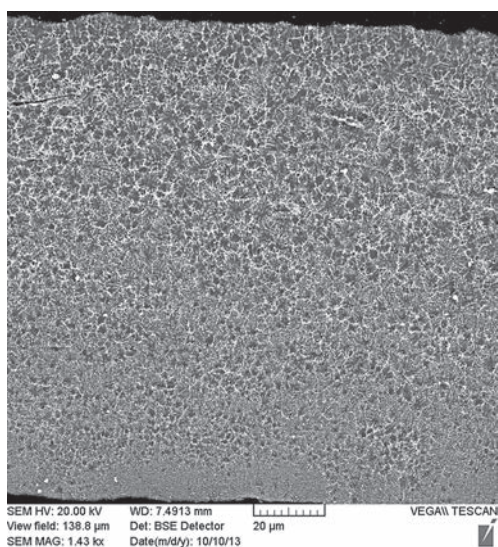
Выбор данных сплавов обусловлен тем, что сплавы алюминий – медь характеризуются естественным старением вследствие распада твердого раствора, способствующего упрочнению сплава, а система алюминий – хром отличается стабильностью вторичных фаз.

Микроструктура ленты толщиной 150 мкм из сплава алюминия с 5% меди приведена на рис. 2. Из рисунка видно, что у охлаждаемой поверхности в слое толщиной 25–30 мкм присутствуют столбчатые кристаллы, которые сменяются равномерными округлыми зёрнами размером около 10 мкм. По сечению ленты отмечены выделения избыточной фазы осаждения, которая в основном присут-

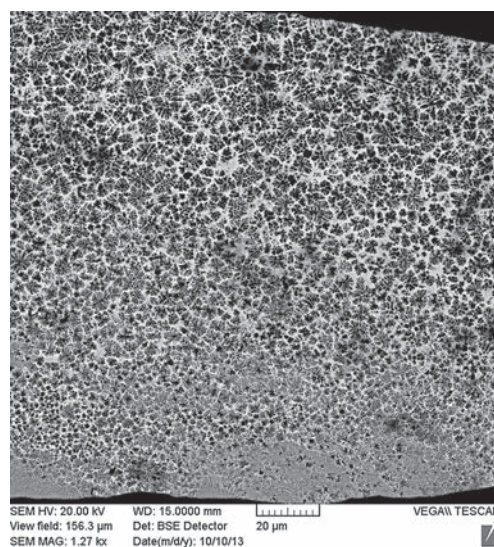
ствует по границам зерен, но по мере удаления от охлаждаемой поверхности включения этой фазы присутствуют и в объеме зерен матричного сплава.

Рентгенофазовый анализ показал, что в лентах сплава Al-5Cu, полученных со скоростями охлаждения выше  $10^5$  К/с, присутствуют  $\alpha_{Al}$ -твердый раствор и метастабильная фаза CuAl (моноклинная) при среднем содержании меди в твердом растворе 3,85% (77% от общего содержания меди). Причем количество этой фазы уменьшается с образованием стабильной фазы CuAl<sub>2</sub> в быстрозакаленных сплавах с содержанием меди более чем 10%.

На рис. 3 приведены микроструктуры бинарных сплавов алюминия с 15 и 25% меди. Начиная с 15% меди при максимальной скорости кристаллизации сплавов на рентгенограммах появляются линии другой метастабильной фазы Cu<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>, что



а



б

Рис. 3. Микроструктура сплавов алюминия с 15% (а) и 25% (б) меди, полученных при скорости охлаждения из жидкого состояния около  $10^5$  К/с

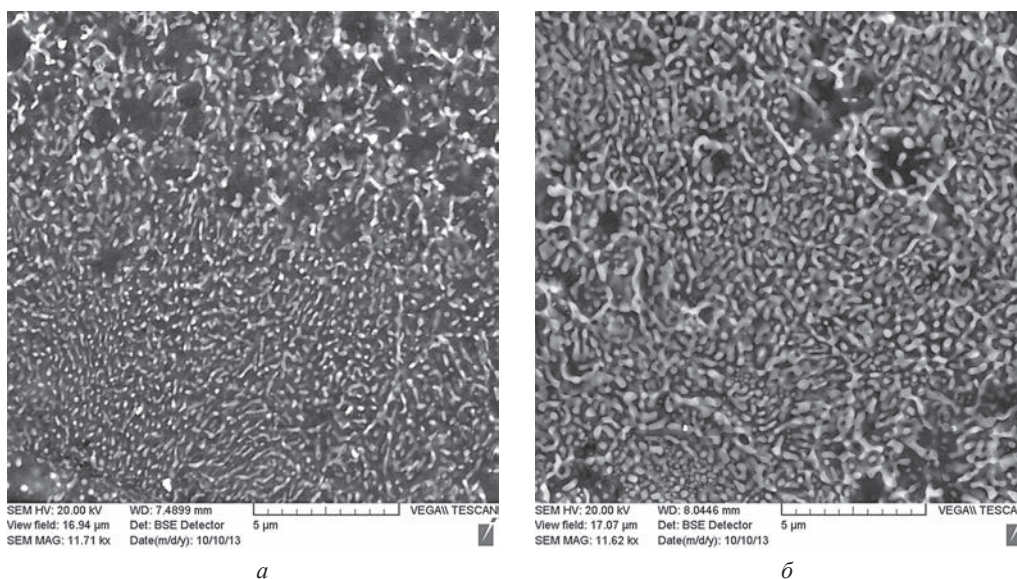


Рис. 4. Микроструктура переходной зоны в лентах из сплавов алюминия с 15% (а) и 25% (б) меди

приводит к изменению характера микроструктуры по сечению. Результатом появления вторичных метастабильных фаз  $\text{CuAl}$  и  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$ , которые богаты медью, является некоторое снижение концентрации меди в твердом растворе по сравнению со сплавами, содержащими 5–10% меди. Это особенно заметно в двухфазной области сильнолегированных сплавов, содержащих свыше 20% Cu (вплоть до эвтектического состава), закристаллизованных с большими скоростями. В сплавах алюминия с 15 и 25% в твердом растворе содержится соответственно 4,25 и 3,9% меди (28,3 и 15,6% от общего содержания меди в сплаве). Структура лент обоих образцов характеризуется наличием следующих фаз:  $\alpha_{\text{Al}}$ -твердый раствор,  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{CuAl}$ ,  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$ . Однако объемное содержание этих фаз различно, что приводит к отличию в микроструктурах (рис. 3).

На рис. 4 приведены микроструктуры переходной зоны быстрозакаленных лент (см. рис. 3). Из рисунка видно, что в сплавах с 15% меди структура имеет более тонкое строение фазовых составляющих и присутствуют наноразмерные частицы, что не наблюдается при повышении содержания меди до 25%.

Таким образом, микроструктура быстрозакаленных (со скоростями охлаждения из жидкого состояния свыше  $10^5$  К/с) сплавов алюминия с медью характеризуется естественным старением с выделением упрочняющей фазы как по границам зерен, так и в их объеме. В то же время сохраняется мелкодисперсная структура в сплавах, содержащих до 15% меди. Результаты исследований показывают, что быстрозакаленные сплавы системы алюминий – медь целесообразно подвергать ис-

кусственному старению для завершения всех процессов структурно-фазовых превращений. В этом случае можно обеспечить стабильность структуры и свойств сплава.

Сразу после литья в микроструктуре быстрозакаленных лент с высоким содержанием хрома наблюдаются две составляющие: не травящийся твердый раствор (возможно очень мелкокристаллическое строение, не выявленное в световом микроскопе) и выделения стабильной фазы  $\text{Al}_7\text{Cr}$  или метастабильной  $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ .

Анализ показывает, что в пересчете на среднюю концентрацию хрома в твердом растворе она должна составлять около 3% при содержании 5% хрома в сплаве. Интерпретируя кривую параметра решетки, можно предположить, что максимальная растворимость хрома в твердом растворе приходится при его содержании в исходном сплаве около 6%. При дальнейшем повышении содержания хрома выделяется значительное количество кристаллов фазы  $\text{Al}_7\text{Cr}$ , параметр решетки растет, твердый раствор обедняется хромом.

Были исследованы два типа микроструктур быстрозакаленных лент из сплава системы алюминий–хром, содержащих 6,8% хрома и 0,8% железа, а также 7,0% хрома и 1,19% железа.

Анализ показывает, что в лентах, полученных при скоростях охлаждения порядка  $10^5$  К/с и содержащих хром в количестве 6,8%, отмечаются ближе к свободной поверхности достаточно крупные включения стабильной фазы  $\text{Al}_7\text{Cr}$  длиной до 30 мкм. Это же было характерно и для литого состояния (рис. 5, а). Кроме того, отмечается присутствие фаз, содержащих железо или, возможно, железо и хром.

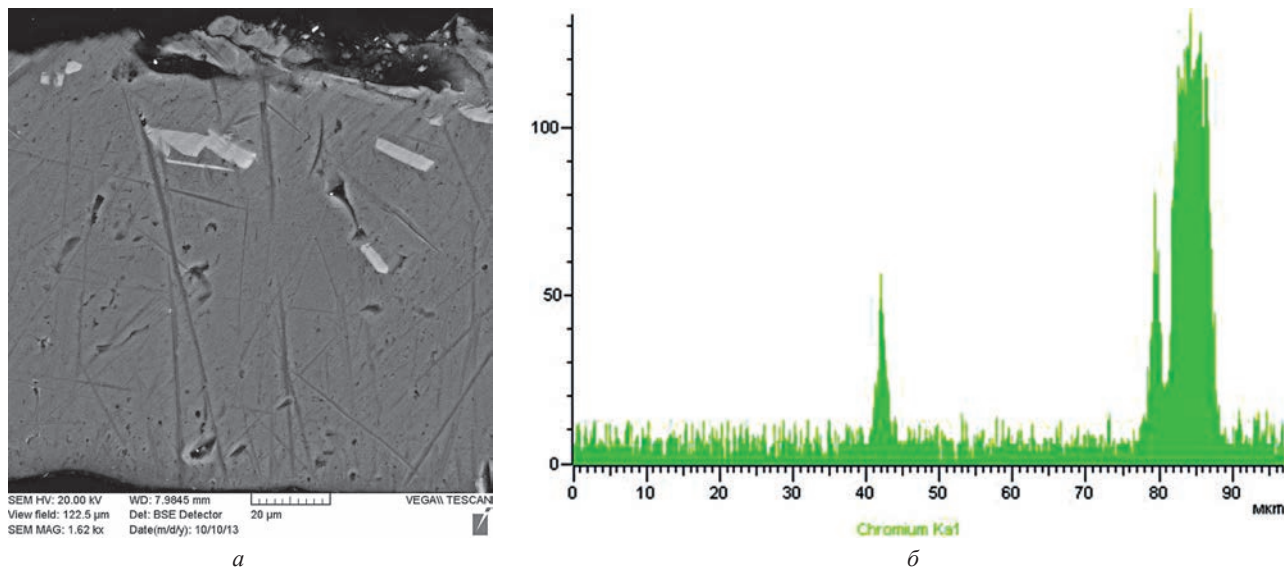


Рис. 5. Микроструктура ленты из сплава Al – 6,8Cr – 0,8Fe, полученной при скорости охлаждения  $10^5$  К/с (а) и распределение хрома по линии (б)

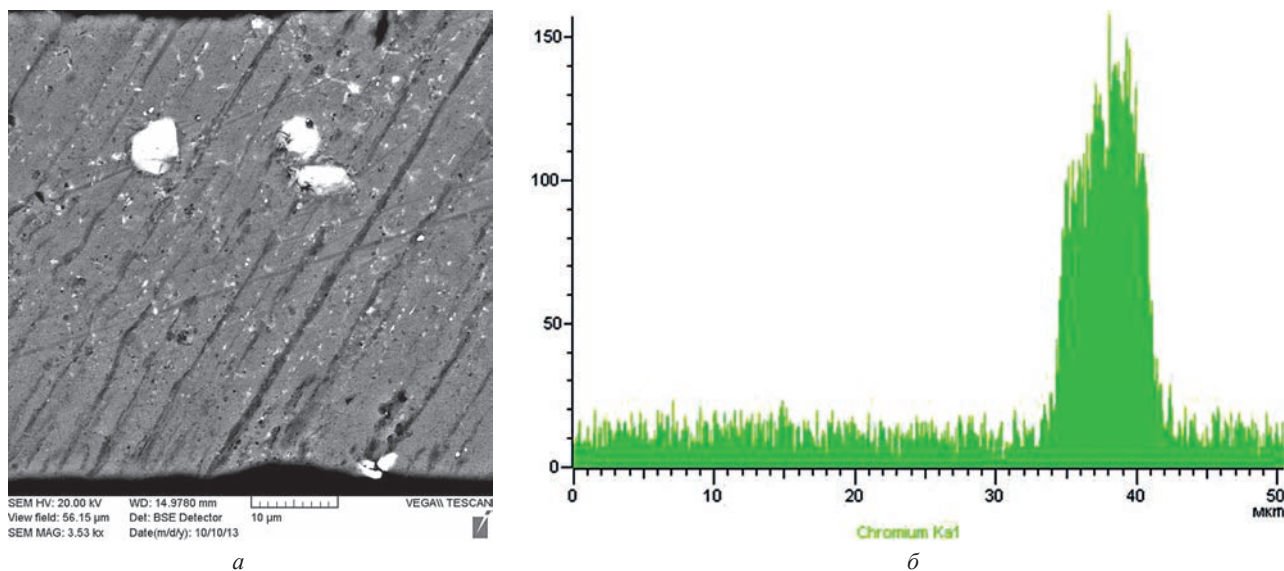


Рис. 6. Микроструктура ленты из сплава Al – 7,0Cr – 1,19Fe, полученной при скорости охлаждения  $10^6$  К/с (а) и распределение хрома по линии (б)

При повышении скорости охлаждения до  $10^6$  К/с даже при содержании хрома, равное 7%, наблюдаются включения хромистой фазы компактной округлой формы, вероятнее всего, метастабильной фазы  $Al_{11}Cr_2$  (рис. 6, а). Это подтверждается и распределением хрома по линии для перво-

го и второго образца (рис. 5, б, 6, б). В метастабильной фазе содержание хрома составляет 25,94%, а в стабильной – 21,58%. Причем при более высокой скорости охлаждения формируются столбчатые кристаллы, в которых наблюдаются наноразмерные фазы, содержащие железо и хром.

### Литература

1. Калиниченко А. С., Бергманн Г. В. Управляемое направленное затвердевание и лазерная обработка: теория и практика. Мн.: Технопринт, 2001.
2. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Баранов К. Н. Исследование литья полых заготовок из силумина АК18 методом намораживания на водоохлаждаемом стержне // Литье и металлургия. 2011. № 3. С. 65–67.
3. Ovchinnikov V. I., Roman O. V., Usherenko S. M., Kalinichenko A. S. Effect of Processing with High-speed Particles and Explosion Energy on Mechanical Properties of Materials // Shock-Assisted Synthesis and Modification of Materials. Eds. A.A. Deribas, Yu. B. Scheck.- Moscow: Torus Press Ltd. 2006. P. 96–97.
4. Кезик В. Я., Калиниченко А. С. Упрочнение литых макрогетерогенных композитов // Литье и металлургия. 2004. № 1. С. 40–44.
5. Калиниченко А. С. Применение неравновесных процессов затвердевания для получения материалов с улучшенными свойствами // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 49–54.