

УДК 539.216+669.017:661.655

И. М. Спиридонова, Г. В. Зинковский

Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара

ВЛИЯНИЕ ПЕРИТЕКТИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ НА СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВО-МЕДНЫХ СПЛАВОВ С ПЕРЕХОДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В роботі здійснена спроба використати ефект пересичення твердого розчину на основі алюмінію в результаті підживлення його перехідними елементами в процесі завершення перитектичних перетворень для підвищення міцності сплавів алюмінію на прикладі потрійних систем Al-Cu-(Mn,Cr,V,W,Mo). За допомогою рентгеноструктурного, диференційного термічного, мікроструктурного аналізів та методом механічних іспитів вивчено вплив різних видів термообробки на мікротвердість α -твердого розчину, період його кристалічної ґратки, модуль Юнга та міцність потрійних ливарних сплавів. Запропоновано перспективний спосіб термообробки, який базується на ефекті пересичення твердого розчину в результаті перитектичних перетворень. Він складається з трьох етапів – гомогенізуючий відпал при температурах нижче плавлення евтектики, наступний високо-температурний відпал для завершення перитектичних перетворень, та заключне штучне старіння. Для всіх вивчених систем відмічено підвищення граничної міцності, плинності та відносного подовження. Максимальне зміцнення 67– 80 % спостерігали в системі Al-Cu-V. Зміцненню сплавів сприяють пересичення твердого розчину алюмінію, зростання мікронапружень у ньому та перетворення інтерметалічних сполук з високим вмістом легуючих елементів в менш крихкі з більшим вмістом алюмінію фази з відносно меншою питомою поверхнею границь розділу.

Ключові слова: перитектичні перетворення, міцність, властивості алюмінієво-мідних сплавів.

В работе предпринята попытка использовать эффект пересыщения твердого раствора на основе алюминия в результате подпитки его переходными элементами в процессе завершения не окончившихся перитектических превращений для повышения прочности высоколегированных сплавов алюминия на примере тройных систем Al-Cu-(Mn,Cr,V,W,Mo). С помощью рентгеноструктурного, дифференциального термического, микроструктурного анализов и методом механических испытаний изучены влияние различных видов термообработки на структуру, микротвердость α -твердого раствора, период его кристаллической решетки, модуль Юнга и прочность литых сплавов. Предложен перспективный способ термообработки, основанный на эффекте пересыщения твердого раствора в результате перитектических превращений. Он состоит из трех этапов – гомогенизирующий отжиг при температурах ниже плавления эвтектики, последующий высокотемпературный отжиг для завершения перитектических превращений, и заключительное искусственное старение. Для всех изученных систем отмечено повышение пределов прочности, текучести и относительного удлинения. Максимальное упрочнение 67 – 80 % наблюдали в системе Al-Cu-V. Упрочнению сплавов способствуют пересыщение твёрдого раствора алюминия и рост микронапряжений в нём и переход интерметаллических соединений с высоким содержанием легирующих элементов в менее хрупкие, содержащие больше алюминия фазы с относительно меньшей удельной поверхностью границ раздела.

Ключевые слова: перитектические превращения, прочность, свойства алюминиево-медных сплавов.

The attempt to use effect of the aluminum solid solution super saturation as a result of transition elements salvation during of not complete peritectic transformation was made due to increase strength of high-alloyed ternary Al-2,5%Cu-(Mn,Cr,V,W,Mo) alloys.

Influence of different treatments on micro hardness of the α -solid solution, it's lattice parameter, Young modulus and strength of the casting alloys was investigated using x-ray, differential thermal, microstructure analyses and mechanical testing. The available treatment, based on the solid solutions super saturation effect, as the result of the peritectic transformation, has been suggested. It consist of three stages – the homogenizing annealing below eutectic temperature, the high temperature annealing to complete the peritectic transformation, and the finish temper age hardening. Increasing of the ultimate strength limit, the yield point limit and the tensile elongation was stressed for all systems. Maximum of strengthening 67 – 80 % was found for Al-Cu-V system. Effect of the aluminum solid solution super saturation and it's microstresses grows result strengthening of investigated alloys.

Keywords: the peritectic transformation, strength, properties of aluminum-copper alloys.

Введение

В [1; 2; 3] показано, что в двойных системах Al – Mn, Al – Cr, Al – V, Al – Mo в процессе завершения не окончившихся перитектических превращений при отжигах ниже температуры солидуса повышается микротвердость твердого раствора алюминия и изменяется его период решетки. Впоследствии, выявленный эффект пересыщения твердого раствора на основе алюминия в результате подпитки его переходными элементами, наблюдали в тех же условиях и для тройных сплавов Al – Cu – (Mn, Cr, V, W, Mo)[4]. Дополнительно, в этой работе, зафиксировано повышение микронапряжений твердого раствора вследствие фазового наклепа, возникающего из-за разницы в удельных объемах фаз – участниц перитектического превращения. Предпринята попытка использовать обнаруженные явления для повышения прочности высоколегированных сплавов алюминия.

Методика экспериментов

Для приготовления сплавов использовали чистый алюминий марки АВ000, двойные лигатуры, и электролитическая медь. Плавки велись в графитовых тиглях. Разливку производили при температурах 1073 – 1173 К после предварительного перемешивания. Отливка сечением 30×30 мм и длиной 240 – 250 мм разрезалась на 4 части по продольной оси. Термообработка образцов проводилась в муфельной печи в массивном металлическом боксе. Градиент температур внутри бокса, как и точность регулировки температур, не превышали 5 К. Искусственное старение сплавов производилось при температуре 453 К.

Механические испытания проводили на малых пятикратных образцах, изготовленных в соответствии с ГОСТ 1497 – 73 ($d_0=5\text{мм}$, $l_0=25\text{мм}$), при скорости испытаний порядка 6 кГ/мин, на машине для механических испытаний марки «ЦДМ-2,5т». Для измерения модуля Юнга использован динамический метод. Плотность сплавов определяли на предварительно измельченных (ввиду значительной пористости), прошедших различные ступени термообработки, образцах методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 25281 – 82). В качестве рабочей жидкости использовали четыреххлористый углерод плотностью 1,595 г/см³. Измерение периода решетки твердого раствора алюминия осуществляли фотометодом в РКЭ камере в медном излучении по линии с индексами (422).

Для исследования влияния термообработки на механические свойства приготовлены 5 сплавов (табл. 1). Первой ступенью термообработки должен быть гомогенизирующий отжиг (Гом.) при температурах ниже плавления эвтектики, переводящей всю медь, присутствующую в сплаве, в твердый раствор. Последующий высокотемпературный отжиг (ВТО) и старение (Ст.) должны придать сплаву высокие эксплуатационные свойства. Для сравнения изготавливалась еще одна группа образцов – гомогенизированных и состаренных. Старению, в этом случае, предшествовал нагрев под закалку до температуры ВТО.

Результаты и их обсуждение

Исследование микроструктуры показало, что в исходном состоянии литые сплавы состоят из пересыщенного α -твердого раствора, выделений эвтектики Al – Al₂Cu, располагающихся на границах зерен, и дисперсных алюминидов: Al₄Mn, Al₅Mo, Al₃V, Al₄W, Al₇Cr, – в зависимости от системы легирования. Первая ступень термообработки – гомогенизирующий отжиг, приводит к тому, что вся медь переходит в твердый раствор, выделения Al₂Cu растворяются и на микрошлифе видны лишь следы исчезнувшей эвтектики. В системах Al – Mn – Cu и Al – V – Cu после гомогенизирующего отжига в значительной степени происходят фазовые превращения Al₄Mn → Al₆Mn + Cu₂Mn₃Al₂₀ и Al₃V → Al₁₁V. В системе Al – W – Cu наблюдается начало превращения Al₄W → Al₁₂W. С целью установления максимально возможной температуры второй ступени термообработки – высокотемпературного отжига – был проведен дифференциальный термический анализ гомогенизированных образцов, не имеющих в своем составе эвтектики (табл. 1). Во всех исследуемых сплавах температура плавления твердого раствора лежит выше 878 – 883 К. Поэтому для высокотемпературного отжига выбрана температура 873 – 878 К. Время высокотемпературного отжига, рассчитанное по кинетическим кривым превращений, составляло: система Al – Mn – Cu – 10 часов; система Al – V – Cu – 15 часов; системы Al – W – Cu, Al – Mo – Cu, Al – Cr – Cu – 20 часов.

Таблица 1

Результаты дифференциального термического анализа

		Температура, К				
		Эвтектика		Твердый раствор		Al _x Me – в Al _y Me
N	Состав, % по массе	на- грев	охлажде- ние	нагрев	охлажде ние	нагрев
1	Al + 4 % Mn – 2,5 % Cu	–	821 – 819	918 – 993	–	985
2	Al + 5 % Mo – 2,5 % Cu	–	821	888 – 938	–	985
3	Al + 2,5 % V – 2,5 % Cu	–	–	893 – 933	945 – 933	998 – 1005
4	Al + 3 % W – 3 % Cu	–	823	887 – 927	923 – 928	–
5	Al + 3 % Cr – 2,5 % Cu	–	821	878 – 933	933 – 923	1008

Микроструктурные исследования показали, что в сплавах, содержащих W, Mo, Mn после ВТО превращения прошли полностью: Al_4W превратился в $Al_{12}W$, Al_4Mo , Al_5Mo в $Al_{12}Mo$ и Al_4Mn – в Al_6Mn и тройную фазу. В системе Al – V – Cu превращение Al_3V в $Al_{11}V$ прошло полностью, но уже начали зарождаться частицы Al_6V . Поэтому сплав выдерживался ещё 5 часов до состояния равновесия, т. е. полного исчезновения фазы $Al_{11}V$. В сплавах Al – Cu – Cr не замечено никаких следов превращений. Это объясняется тем, что из алюминидов хрома система содержит только фазу Al_7Cr , которая образовалась неперитектическим путем, стабильную в данном интервале температур.

Результаты изучения влияния термообработки на микротвердость α -твердого раствора, период его кристаллической решетки и модуль Юнга сплава приведены на рис.1. В системе Al – Cu – Mn изменение микротвердости можно объяснить выделением меди из α -твердого раствора, которая расходуется на образование тройной фазы, что подтверждается и изменением периода решетки α -твердого раствора. Старение еще больше увеличивает параметр решетки, т. к. в процессе старения медь продолжает выделяться из пересыщенного твердого раствора. Высокотемпературный отжиг незначительно его снижает, что можно объяснить подпиткой твердого раствора марганцем в ходе превращения. Последующее старение приводит к новому повышению периода. Приблизительно те же закономерности наблюдаются для систем, содержащих Mo, V, W, а для систем Al – Cr – Cu заметных изменений параметра кристаллической решетки α -твердого раствора не обнаружено.

В процессе термообработки плотность образцов понижается, что можно объяснить изменением количества высоко и низкотемпературных интерметаллидов алюминия в структуре сплавов. Изменяется также и модуль упругости, причем после гомогенизации и последующего старения он возрастает, ввиду упрочнения сплава, а после высокотемпературного отжига несколько понижается в силу тех же причин, что и плотность. (рис.1).

Из-за несовершенной технологии литья, в сечении разрыва прошедших механические испытания образцов можно было обнаружить многочисленные дефекты: неметаллические включения, раковины. Поэтому результаты механических испытаний представлены как средним значением предела прочности, предела текучести, так и средним из двух лучших значений (рис. 2).

В системе Al – Mn – Cu механические свойства сплава, прошедшего высокотемпературный отжиг, улучшились на 18 %, в сравнении со сплавом, прошедшим гомогенизирующий отжиг. Высокотемпературный отжиг с последующим искусственным старением, увеличивает прочность на 19 %, по сравнению со сплавом, который не отжигался. То же наблюдается и для сплава Al – 5 % Mo – 2,5 % Cu. Прочность сплава, прошедшего ВТО и старение, выше прочности исходного сплава на 40 %, и выше прочности сплава, прошедшего гомогенизирующий отжиг с последующим искусственным старением, на 30 %. Сплав с ванадием, после ВТО и старения, прочнее исходного на 67 %, а сплав, прошедший ВТО, прочнее гомогенизированного на 80 %.

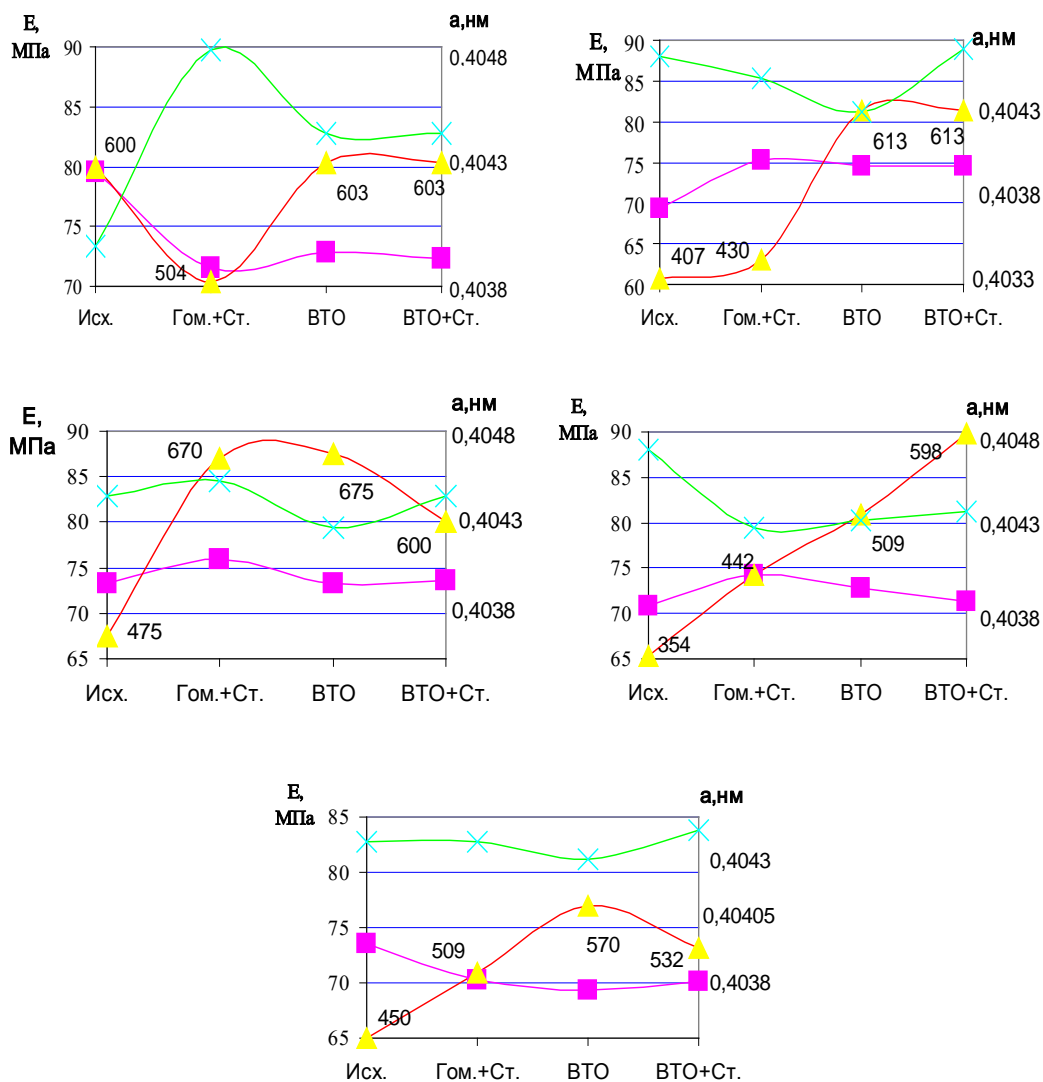


Рис.1 Свойства сплавов на различных ступенях термической обработки: □ – модуль Юнга (МПа), Δ – микротвердость (МПа), значение указано рядом; X – период решетки твердого раствора алюминия (нм) – а) Al + 4% Mn – 2,5% Cu; б) Al + 5% Mo – 2,5% Cu ; в) Al + 2,5% V – 2,5% Cu; г) Al + 3% W – 2,5% Cu; д) Al + 3% Cr – 2,5% Cu

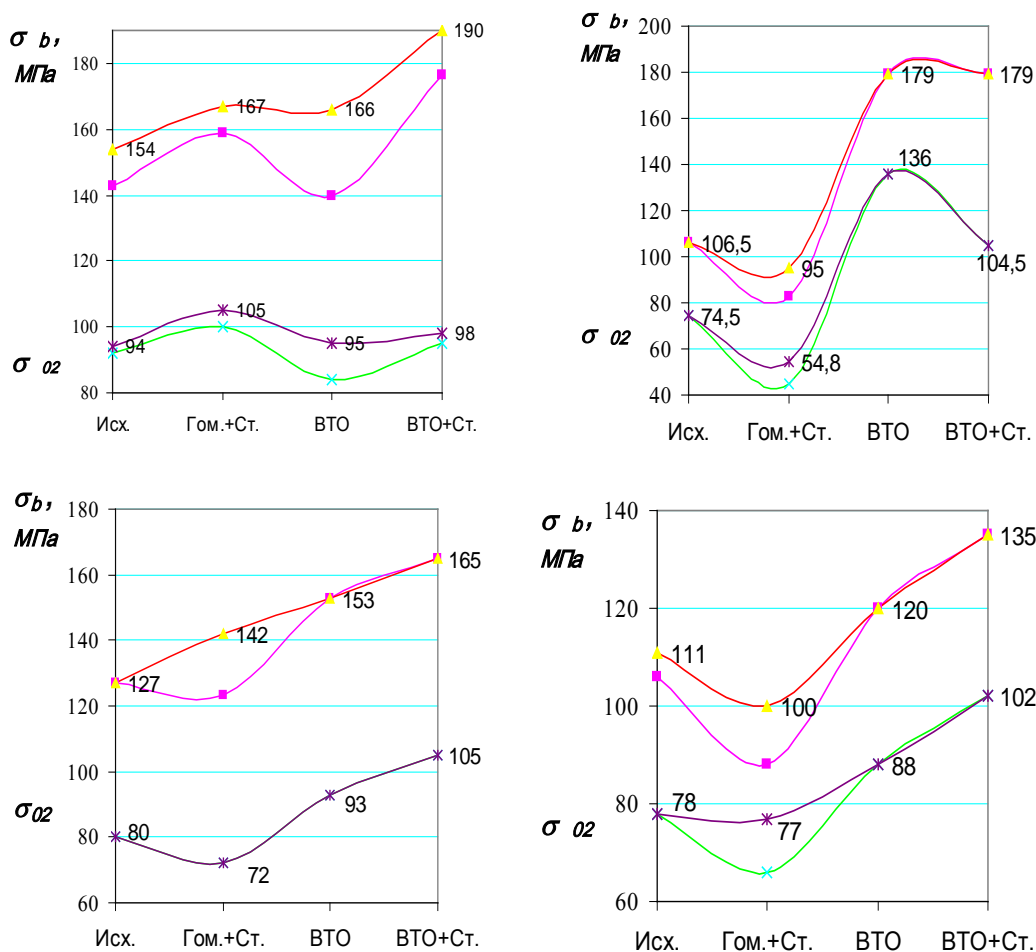


Рис.2 Прочностные свойства сплавов на различных ступенях термической обработки:
 □, Δ – среднее значение; *, X – среднее из двух лучших. а) Al + 4 % Mn – 2,5 % Cu; б) Al + 2.5 % V – 2.5 % Cu ; в) Al + 3 % W – 2.5 % Cu; г) Al + 3 % Cr – 2.5 % Cu

Следует отметить, что относительное удлинение, измеренное непосредственно на образцах после разрыва, для сплавов, прошедших ВТО и старение, увеличивается до 6 – 7 %, против приблизительно 3 % у литых сплавов. Что касается предела текучести $\sigma_{0,2}$, то он возрастает, хотя в значительно меньшей степени, чем прочность. (рис.2).

Заключение

Таким образом, высокотемпературный отжиг улучшает механические свойства исследованных сплавов. Эффект пересыщения твердого раствора на основе алюминия в результате перитектических превращений позволяет предложить перспективный способ термообработки, примененный выше. Отжиг при высоких температурах, позволяет добиться того, что интерметаллические соединения с высоким содержанием легирующих элементов превратятся в менее хрупкие, содержащие больше алюминия фазы с меньшей удельной поверхностью границ раздела. Во время высокотемпературного отжига диффузионные процессы залечивают большую часть дефектов, а пересыщение твердого раствора алюминия и рост микронапряжений в нём способствуют упрочнению сплава в целом.

Библиографические ссылки

1. **Венгринович Р. Д.** О фазовых превращениях в неравновесно закристаллизованных сплавах Al – Cr и Al – Mn/ Р. Д. Венгринович, В. И. Псарев //ФММ. – 1969. – Т.29. – N3. – С.540 – 546
2. **Венгринович Р. Д.** Неравновесная кристаллизация и структурные превращения при нагреве сплавов Al – Mo и Al – Cr / Р. Д. Венгринович// Изв. АН СССР. Металлы. – 1970. – N5. – С.186 – 193.
3. **Горичок Б. О.** Метастабильные фазы в сплавах алюминия с хромом, ванадием и кобальтом/ Б. О. Горичок, Р. Д. Венгринович // Изв. ВУЗов. Цветные металлы.1979. – № 1. – С. 99 – 102.
4. **Зинковский Г. В.** Свойства и тонкая структура твердого раствора алюминия в сплавах алюминия с медью и переходными металлами. / Г. В. Зинковский, Б. Н. Литвин, И. М. Спиридонова //Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Фізика. Радіоелектроніка». 1999. – Вип. 5. – С.39 – 45.

Надійшла до редколегії 07.06.2011