

О ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ИНТЕРВАЛА ХРУПКОСТИ В КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

В.С. Золоторевский¹, А.В. Поздняков¹, Д.А. Колесников²

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский пр. д. 4, г. Москва, Россия, 119049, (495)9550134, E-mail: pozdniakov@misis.ru

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул.Победы, 85, г. Белгород, Россия, 308015

Заключение совета рецензентов: 27.12.12.

Заключение совета экспертов: 06.12.12.

Принято к публикации: 10.12.12.

В настоящей работе проведен анализ температурных зависимостей экспериментально определенного относительного удлинения и расчетного количества жидкости в интервале кристаллизации. На примере сплавов двойных систем Al-Cu и Al-Mg показано, что пластичность в интервале кристаллизации хорошо коррелирует с количеством жидкой фазы и оказывает влияние на склонность к образованию кристаллизационных трещин. Показано также, что и пластичность сплавов тройных систем достаточно хорошо коррелирует с рассчитанным количеством жидкой фазы.

ABOUT POSSIBILITY OF CALCULATING THE BRITTLE TEMPERATURE RANGE IN ALLOYS BASED ON ALUMINUM

V.S. Zolotarevskiy¹, A.V. Pozdniakov¹, D.A. Kolesnikov²

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Leninskiy pr. 4, Moscow, Russia, 119049, (495)9550134, E-mail: pozdniakov@misis.ru

² Belgorod State National Research University, 85 Pobeda Str., Belgorod 308015, Russia

Referred: 27.12.12.

Expertise: 06.12.12.

Accepted: 10.12.12.

In this paper we analyze the temperature dependence of experimental determination of elongation and calculated the amount of fluid in the range of solidification. On the example of the binary systems of alloys Al-Cu and Al-Mg shows that plasticity in the crystallization interval correlates well with the amount of the liquid phase and influence the tendency to solidification cracks. It is also shown that the plasticity of the alloy and the ternary systems is well correlated with the calculated amount of liquid phase.

В.С. Золоторевский. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», образование высшее, профессор кафедры металловедения цветных металлов, доктор технических наук, металловедение и термическая обработка сплавов цветных металлов, количество публикаций: 250.

А.В. Поздняков. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», образование высшее, ассистент кафедры металловедения цветных металлов, аспирант, металловедение и термическая обработка сплавов цветных металлов, количество публикаций: 16.

Д.А. Колесников. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, образование высшее, кандидат технических наук, заведующий лабораторией электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа ЦКП «Диагностика структуры и свойств наноматериалов», упрочняющие покрытия; конструкционная керамика, получаемая методом холодного изостатического прессования; функциональные наноматериалы.

V.S. Zolotarevskiy. National University of Science and Technology «MISIS», higher education, professor of physical metallurgy of non-ferrous metals, doctor of technical sciences, metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals, number of publications: 250.

A.V. Pozdniakov. National University of Science and Technology «MISIS», higher education, assistant professor of metallurgy of nonferrous metals, post graduate student, metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals, the number of publications: 16.

D.A. Kolesnikov. Belgorod State National Research University, Ph.D., Head of Laboratory of electron microscopy and X-ray analysis JRC "Diagnosis of the structure and properties of nanomaterials", Number of publications: 500.



ВВЕДЕНИЕ

Проблема горячих трещин при литье и сварке приобрела особенно большую остроту в связи с развитием производства новых высокопрочных и жаропрочных сплавов, так как области их составов на диаграммах состояния, соответствующие максимальной прочности и жаропрочности, часто совпадают с областью составов наиболее горячеломких сплавов. В связи с этим необходим такой научно обоснованный подход к разработке новых и улучшению существующих сплавов, при котором наряду с получением высокой прочности, жаропрочности и других эксплуатационных свойств обеспечивалась бы высокая сопротивляемость сплавов образованию горячих трещин при литье слитков и фасонных отливок, а также при сварке с плавлением.

Известно, что горячеломкость определяется эффективным интервалом кристаллизации (ЭИК) [1-3] и температурным интервалом хрупкости (ТИХ) внутри ЭИК [2,4]. При поиске новых сплавов снижения горячеломкости достигают обычно в результате трудоемких экспериментальных исследований. Целью настоящей работы является термодинамический расчет величины ТИХ и анализ его связи с показателем горячеломкости в двойных и трехкомпонентных сплавах на основе алюминия.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показатели пластичности в твердо-жидком состоянии, как характеристики сопротивляемости хрупкому разрушению, являются очень важными для горячеломкости сплавов при литье [2, 4]. При кристаллизации внутри ТИХ сплав должен обладать некоторым удлинением. В противном случае при затрудненной усадке в отливке из-за абсолютной хрупкости сплава всегда бы неизбежно образовывались трещины, чего в действительности не наблюдается. Сплавы разного состава и даже на разных основах различаются относительным удлинением в интервале хрупкости обычно не более чем на несколько десятых долей процента.

На первый взгляд может показаться, что значения относительного удлинения выше солидуса и тем более их изменения при переходе от одного сплава к другому настолько малы, что они не представляют никакого практического интереса и их можно не учитывать. Такая точка зрения основывается на привычных представлениях о роли относительного удлинения в определении эксплуатационных характеристик изделия. Однако на самом деле небольшие изменения удлинения в твердо-жидком состоянии являются ответственными за изменения горячеломкости при литье и сварке и пред-

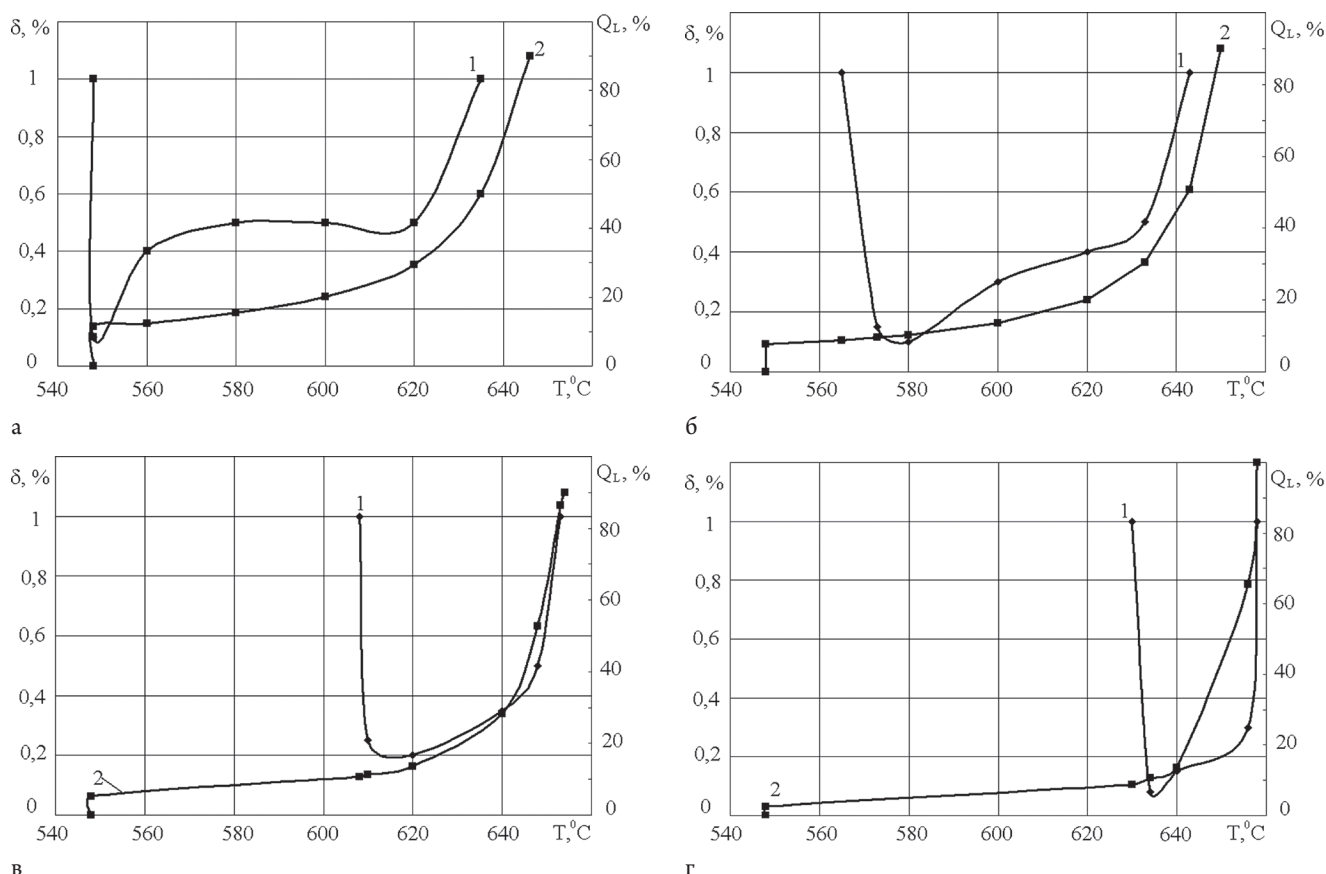


Рис. 1 – Зависимость пластичности δ (кривая 1) и объемной доли жидкой фазы Q_L (кривая 2) от температуры в двойных сплавах системы Al – Cu: а - Al – 5 %Cu; б - Al – 3,5 %Cu; в - Al – 2,5 %Cu; г - Al – 1,3 %Cu

Fig. 1 – Dependence plasticity δ (curve 1) and the volume fraction of the liquid phase Q_L (curve 2) from the temperature of the system in binary alloys Al – Cu: а - Al – 5 %Cu; б - Al – 3,5 %Cu; в - Al – 2,5 %Cu; г - Al – 1,3 %Cu

ставляют поэтому большой практический интерес.

И.И.Новиков [2] показал, что ширина ТИХ в твердо-жидком состоянии у разных сплавов весьма различна. У одних сплавов она составляет несколько градусов, а у других - сотни градусов. В монографии [2] представлены зависимости пластичности от температуры в сплавах систем Al – Cu и Al – Mg (кривая 1 на рисунках 1 - 2). Видно, что почти у всех сплавов системы Al – Mg пластичность выше в 2 – 3 раза по сравнению со сплавами системы Al – Cu.

Поскольку экспериментальное определение температурного интервала хрупкости очень трудоемко, весьма полезно попытаться определить его расчетным путем. Программа Thermo-Calc позволяет рассчитывать массовую долю жидкости (Q_M) в зависимости от температуры неравновесной кристаллизации, идущей в условиях полного подавления выравнивающей диффузии в твердом состоянии и полного прохождения двух других диффузионных процессов: разделительной диффузии на фронте кристаллизации и выравнивающей диффузии в расплаве. Объемную долю жидкости (Q_L) определяли по формуле 1 через рассчитанную в программе Thermo-Calc массовую долю жидкости (Q_M) и плотность сплава (ρ_L), соответствующего составу жидкости при температуре заковки, считая, что жидкость ведет себя как самостоятельно кристаллизующийся сплав:

$$Q_L = \frac{\frac{Q_M}{\rho_L}}{\frac{Q_M}{\rho_L} + \frac{Q_{(Al)}}{\rho_{(Al)}}}, (1)$$

где Q_L - объемная доля жидкости, %;
 Q_M - массовая доля жидкой фазы, %;
 ρ_L - плотность сплава соответствующего составу жидкости при температуре заковки, г/см³;
 $Q_{(Al)}$ - массовая доля твердого раствора на основе алюминия, %;
 $\rho_{(Al)}$ - плотность твердого раствора на основе алюминия, г/см³.

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости относительного удлинения δ (кривая 1) и рассчитанной объемной доли жидкой фазы Q_L (кривая 2) от температуры в двойных сплавах систем Al-Cu и Al – Mg. Как видно из рисунков 1 и 2, относительное удлинение (кривая 1) достаточно хорошо коррелирует с объемной долей жидкой фазы (кривая 2) в верхней части температурного интервала хрупкости.

Для оценки горячеломкости сплавов часто используют величину эффективного интервала кристаллизации

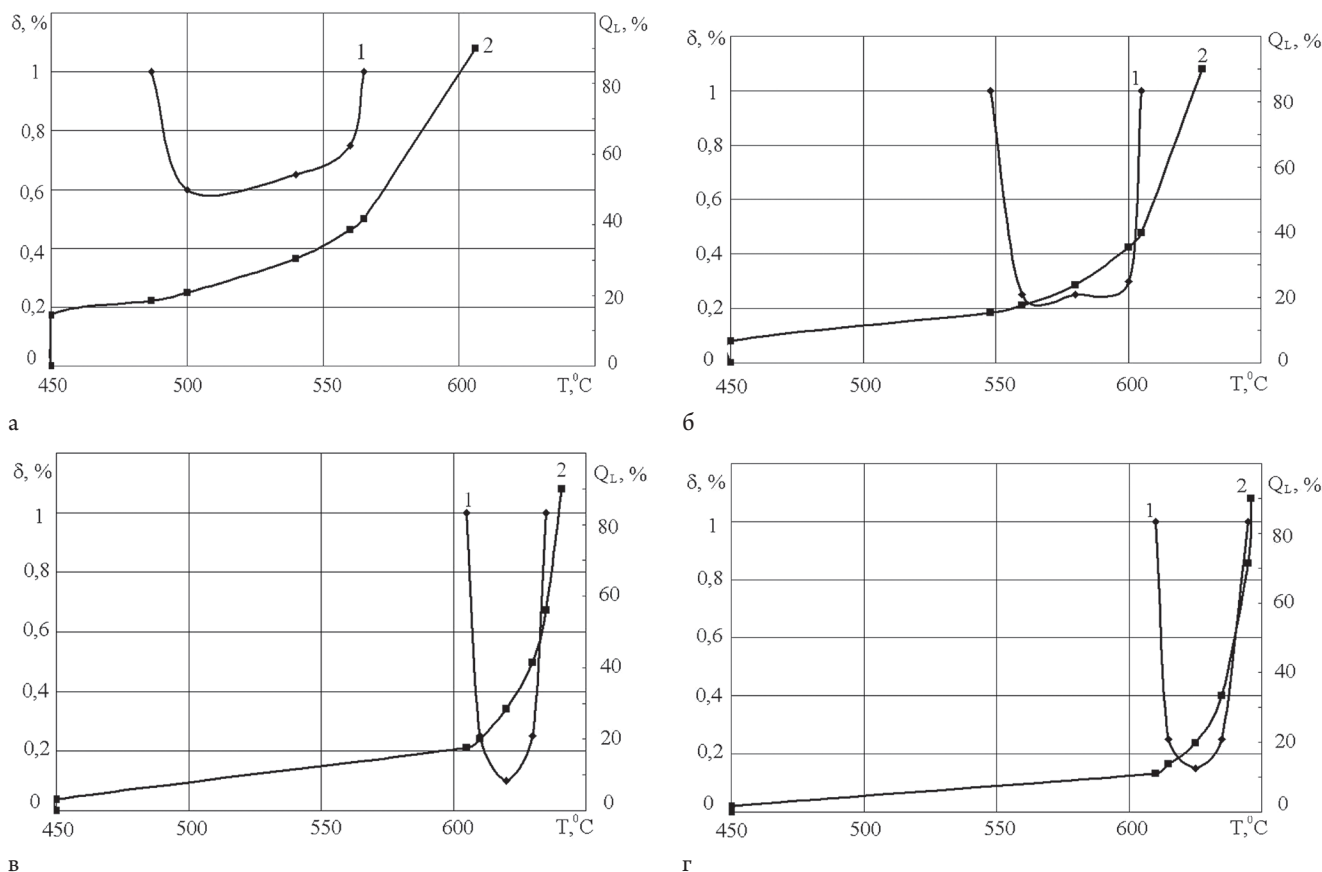


Рис. 2 – Зависимость пластичности δ (кривая 1) и объемной доли жидкой фазы Q_L (кривая 2) от температуры в двойных сплавах системы Al – Mg: а - Al – 10 % Mg; б - Al – 6 % Mg; в - Al – 3,5 % Mg; г - Al – 2,5 % Mg

Fig. 2 – Dependence plasticity δ (curve 1) and the volume fraction of the liquid phase Q_L (curve 2) from the temperature of the system in binary alloys Al – Mg: а - Al – 10 % Mg; б - Al – 6 % Mg; в - Al – 3,5 % Mg; г - Al – 2,5 % Mg

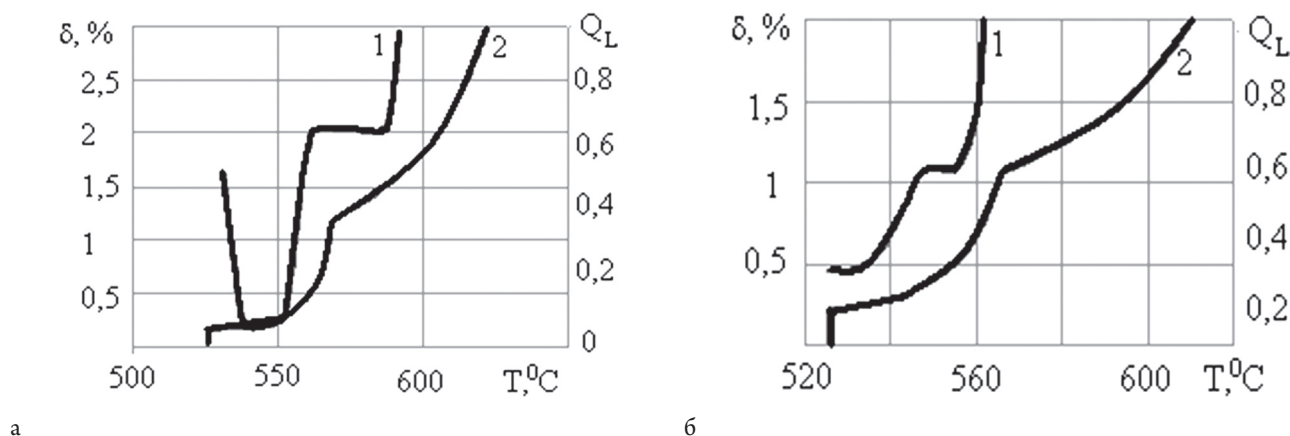


Рис. 3 – Зависимость пластичности δ (кривая 1) и объемной доли жидкой фазы Q_L (кривая 2) от температуры в сплавах Al – 5%Si – 2%Cu (а) и Al – 6%Si – 4%Cu (б)

Fig. 3 – Dependence plasticity δ (curve 1) and the volume fraction of the liquid phase Q_L (curve 2) from the temperature of the alloys: сплавах Al – 5%Si – 2%Cu (а) и Al – 6%Si – 4%Cu (б)

(ЭИК) [1-3, 5]. Считается, что чем эта величина меньше, тем лучше литейные свойства. Однако, например, сплавы системы Al-Cu обладают гораздо большей склонностью к образованию горячих трещин, чем сплавы системы Al-Mg [2, 6], но при этом ЭИК у последних гораздо шире, чем у сплавов Al-Cu за счет более низкой эвтектической температуры в системе Al-Mg. Так, у сплава Al-5%Cu ЭИК примерно равен 70°C, а у сплава Al-6%Mg он больше 100°C [2, 4].

Проведенный анализ экспериментальных зависимостей пластичности в ТИХ и рассчитанной доли жидкой фазы показывает, что в сплавах системы Al – Cu нижняя граница температурного интервала хрупкости соответствует примерно 10 % жидкой фазы, а в сплавах системы Al – Mg – примерно 20 % жидкой фазы. Наличием большего количества жидкой фазы в температурном интервале хрупкости в сплавах системы Al – Mg можно объяснить их большую пластичность и меньшую горяче-ломкость.

Разные сплавы могут различаться не только шириной температурного интервала хрупкости выше солидуса и величиной относительного удлинения в этом интервале, но и самим характером температурной зависимости удлинения в твердо-жидком состоянии. Для многих тройных и многокомпонентных сплавов характерно наличие своеобразной «ступеньки» в интервале хрупкости (рисунок 3).

Как видно на рисунке 3, пластичность сплавов тройных систем также достаточно хорошо коррелирует с количеством жидкой фазы. Однако в целом необходимо отметить, что все экспериментальные температурные зависимости относительного удлинения построены по результатам их растяжения при нагреве. Реальные (полученные при кристаллизации до разных температур) зависимости будут несколько отличаться, так как при нагреве происходит частичное растворение неравновесного избытка фаз, к чему особенно чувствительны низколегированные сплавы. В связи с этим в низколегированных сплавах ТИХ смещается в сторону более высо-

ких температур. Реальные же кривые, построенные при кристаллизации, скорее всего, будут более четко коррелировать с количеством жидкой фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ температурных зависимостей экспериментально определенной пластичности и расчетного количества жидкости в интервале кристаллизации. На примере сплавов двойных систем Al-Cu и Al-Mg показано, что пластичность в ТИХ хорошо коррелирует с количеством жидкой фазы и оказывает влияние на склонность к образованию кристаллизационных трещин. Показано также, что и пластичность сплавов тройных систем достаточно хорошо коррелирует с рассчитанным количеством жидкой фазы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России, в рамках Соглашения 14.A18.21.2030 «Особенности физических свойств перспективных материалов (наноматериалов)» (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» НИУ «БелГУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бочвар А.А. // Изв. АН СССР - ОТН - 1942 - №9 - с.31.
- [2] Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. М.: Наука, 1966.
- [3] Zolotarevskiy V. S., Pozdniakov A. V., and Khvan A. V. «Thermodynamic Calculations of the Effective Solidification Range and Its Relation to Hot Cracking of Aluminum-Based Ternary Alloys». Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2011, Vol. 52, No. 1, pp. 50–55.
- [4] Eskin D.G., Suyitno, Katgerman L. Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium alloys. Progress in Materials Science. V. 49, 2004, pp. 629–711
- [5] Zolotarevskiy V.S., Pozdniakov A.V., Kanakidi Ya.Yu. «About the relation between a full and effective solidification range with hot cracking in the multicomponent alloys on the basis of aluminum». Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2012, Vol. 53, No. 5, pp. 392–398.
- [6] Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справ. изд. / Альтман М. Б., Андреев А.Д., Балахонцев Г. А. и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия. 1983. С. 352.