

Иван Сергеевич Зуйко^{1*}, Александр Андреевич Калининко¹, Анна Игоревна Бодякова¹, Сергей Сергеевич Малофеев¹, Марат Разифович Газизов¹, Рустам Оскарлович Кайбышев¹

¹«Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия

**zuiko_ivan@gmail.com*

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ НА СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО СПЛАВА Al–Cu–Mg

В работе было исследовано влияние предварительной деформации и естественного старения на микроструктуру и механические свойства высокопрочного сплава AA2519 (по классификации Aluminum Association). Дефекты кристаллической решетки, привнесенные деформацией, оказывают значительное влияние на характер упрочняющих выделений после естественного старения. Продemonстрировано что небольшая деформация растяжением после естественного старения приводит к дополнительному значительному увеличению прочностных характеристик, при сохранении пластичности.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, старение, микроструктура, Al–Cu–Mg, термомеханическая обработка, фазовый состав, механические свойства, прочность и пластичность.

Ivan S. Zuiko, Alexander A. Kalinenko, Anna I. Bodyakova, Sergey S. Malopheyev, Marat R. Gazizov, Rustam O. Kaibyshev
Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

EFFECT OF PRE-STRETCHING AND NATURAL AGEING ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF HIGH STRENGTH Al–Cu–Mg ALLOY

The work investigated the effect of pre-deformation and natural ageing on the microstructure and mechanical properties of the high-strength alloy AA2519 (on the Aluminum Association classification). Introduced crystalline defects have a significant impact on the nature of the strengthening precipitates after natural ageing. It has been demonstrated that a small percent of pre-stretching after natural ageing leads to a significant increase in strength, while elongation to failure exceeds 20%.

Key words: aluminium alloys, ageing, microstructure, Al–Cu–Mg, thermomechanical treatment, phase composition, mechanical properties, strength and ductility.

На сегодняшний день сплавы Al–Cu–Mg (дуралюмины) широко используются в промышленности благодаря низкой плотности, высокой удельной прочности/жесткости, превосходной вязкости разрушения и хорошей коррозионной стойкости [1,2]. Дальнейшее развитие экономики

стимулирует поиски новых материалов и способов их обработки для достижения ещё более высоких показателей механических и физических (например, электропроводности) свойств. Поэтому как с научной, так и с практической точки зрения создание таких сплавов является актуальной задачей.

В подавляющем большинстве случаев свойства Al–Cu–Mg сплавы обретают после термической обработки, которая включает закалку с высоких (порядка 500°C) температур и старение (по сути, распад пересыщенного твёрдого раствора) [1,2]. Главными упрочняющими выделениями в сплавах Al–Cu–Mg (с высоким соотношением Cu/Mg и низким содержанием Si) являются зоны Гинье-Престона (ГП) и частицы θ'' (Al₃Cu), θ' (Al₂Cu) и Ω (Al₂Cu)-фаз [1,3-5]. Иногда для ускорения и усиления эффекта старения в промежутке между закалкой и старением проводят пластическую деформацию. Такая обработка обеспечивает прирост прочности за счёт выделения большего количества дисперсных промежуточных фаз (прежде всего частично когерентных), которые могут зарождаться как гомогенно в теле зёрен, так и на дефектах кристаллической решётки (дислокациях, малоугловых границах и т.д.). Более того известно, что операция правки (растяжением или прогладкой) является стандартной процедурой снятия остаточных напряжений, вызванных закалкой алюминиевых сплавов. Ранее было продемонстрировано [3-5] что пластическая деформация твёрдого раствора положительно отражается на объёмных долях Ω - и θ' -фаз и прочностных свойствах алюминиевых термоупрочняемых сплавов, при этом полностью подавляется выделение когерентных выделений (ГП-зон, θ'' -частиц).

Несмотря на то, что эффект низкотемпературой термомеханической обработки известен [5,6], влияние выдержки (естественного старения) между операциями остаётся малоизученным. Учитывая, что Al–Cu сплавы с добавками Mg демонстрируют прирост прочности/твёрдости при вылеживании после закалки, исследование естественного старения и деформирования на свойства Al–Cu–Mg сплава является актуальной научной и практической задачами.

В качестве материала исследования был использован сплав AA2519. Его химический состав Al–5,64Cu–0,33Mn–0,23Mg–0,11Ti–0,08Fe–0,08Zn–0,1V–0,2Zr (вес. %) был определен методом оптико-эмиссионного анализа с использованием прибора Foundry-Master UVR. Сплав был получен на базе НИУ «БелГУ» методом полунепрерывного литья с высокой скоростью кристаллизации. Слитки, размерами 100мм×120мм×180мм, гомогенизировали при температуре 510°C в течение 24 часов. Затем слитки проковали ($\epsilon_{ист.} \approx 2,0$) и прокатали ($\epsilon_{ист.} \approx 1,4$) при T=425°C. Из горячекатаных плит вырезали образцы (Рисунок 1), обработали на твёрдый раствор при T=535°C в течение 1 часа и закалили в холодную воду (20°C). Сразу после закалки (состояние W) и спустя 120 дней (состояние T4) естественного старения образцы продеформировали на 1 и 3% ($\epsilon \sim 0,01$ и 0,03) методом растяжения при комнатной температуре. Испытания на одноосное растяжение (не менее трёх образцов) и

предварительную деформацию проводили на универсальной электромеханической машине Instron 5882 в соответствии с ГОСТ 1497-84. Начальная скорость деформирования составляла $1,3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, а величина деформации измерялась с помощью высокоточного контактного экстензометра MFX 500.

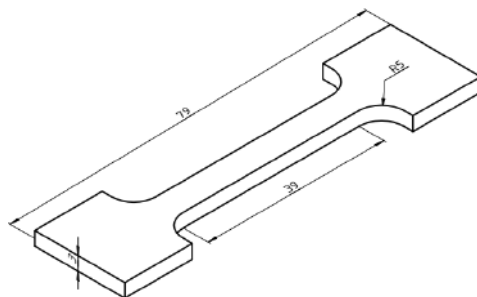


Рис. Геометрические размеры использованных в работе образцов.

В Таблице представлены результаты испытаний, выполненных для определения механических свойств. После закалки (состояние W) сплав ожидаемо демонстрирует низкие показатели прочности при высоких значениях пластичности. Главным механизмом упрочнения в данном состоянии является твёрдорастворный. Присутствие «инородных» атомов локально искажает кристаллическую решетку материала. Возникающие поля упругих напряжений вокруг точечных дефектов затрудняют скольжение и переползание дислокаций, тем самым вызывая рост напряжений для продолжения их движения [7].

Данные таблицы свидетельствуют об увеличении прочности после холодной пластической деформации (состояния W+1% и W+3%), что является типичным для металлов после нагартовки (наклёпа). Повышение прочности связано с ростом плотности дислокаций [3,5]. Однако необходимо отметить, что во время деформации изменяется и концентрация вакансий, что сказывается на протекании процесса старения, т.к. процесс формирования кристаллической структуры выделений обладает диффузионным характером.

После естественного старения (обработки T4) условный предел текучести сплава увеличивается более чем в 2,2 раза, при сохранении удлинения до разрушения $>20\%$. Столь значительный прирост прочности связан с выделением зон Гинье-Престона. Они представляют собой кластеры и/или сегрегации меди на $\{001\}_\alpha$ толщиной преимущественно 1 или 2 (но никогда не больше) атомных слоёв. Диаметр этих выделений варьируется в диапазоне 1-10 нм; расстояние между ними менее 10 нм, а численная плотность составляет $10^{17}-10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Таблица

Механические свойства сплава АА2519 после различных режимов обработки. Величина Δ – разница в величине условного предела текучести между исследуемым состоянием и закалённым состояниями. ЕС – естественное старение. *Свойства сплава после обработки Т6 (закалка + искусственное старение 12 часов при 190°С) взяты из работы [6].

Состояние	Время ЕС, дней	$\sigma_{0,2}$, МПа	Δ	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$
W	-	136±1	-	349±2	28±1	0,386
W+1%	-	179±2	44	353±2	27±1	0,507
W+3%	-	240±2	105	365±2	24±1	0,658
T4	60	305±1	170	455±3	20±1	0,670
T4+1%	120	327±3	177	448±2	21±1	0,730
T4+3%	120	368±2	233	458±1	20±1	0,804
T6*	-	357±3	221	436±2	12±1	0,820

Деформирование естественно состаренных образцов на 1 и 3% (состояния T4+1% и T4+3%) приводит к дальнейшему росту прочности. При этом стоит отметить что значение и прочности и пластичности образцов после 3% пластической деформации оказываются выше, чем после стандартной обработки Т6, включающей искусственное старение. Поскольку столь малая деформация не оказывает существенного вклада в размер зёрен, то это необычное явление можно объяснить синергетическим эффектом вкладов упрочнения от дислокаций и ГП-зон. При этом надо в результате взаимодействия дислокации и зон, последние перерезаются. Об этом свидетельствуют работы Красникова В.С. с коллегами [8].

Авторы считают, что одним из вероятных сценариев является то, что дислокации во время скольжения могут собирать атомы легирующих элементов и образовывать атмосферах Коттрелла. Присутствию таких областей повышенной концентрации примесных атомов внедрения свидетельствуют осцилляции на кривых растяжения закалённого материала [7,9]. Однако стоит подчеркнуть, что необходимы дальнейшие работы в этом направлении, возможно с применением микроскопии высокого разрешения (HAADF-STEM), спектроскопии характеристических потерь энергии электронами (EELS) или 3-х мерной атомной томографии (APT).

Так же хотелось остановиться на отношении $\sigma_{0,2}$ к σ_B . Л.Б. Бер в работе [10] описывает три стадии старения алюминиевых сплавов: стадия когерентных выделений ($\sigma_{0,2}/\sigma_B=0,5-0,7$), стадия частично когерентных выделений ($\sigma_{0,2}/\sigma_B=0,75-0,95$), стадия некогерентных выделений. В случае

исследованного материала деформация на 1 или 3% значительно повышает $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ что косвенно свидетельствует о повышении эффективности в упрочнении структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, код научной темы FZWG-2023-0005 «Природа влияния холодной пластической деформации на фазовые превращения и свойства алюминиевых сплавов», с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals, Fifth Edition / I. Polmear [a. o.]. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2017.
2. Колачев Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. М.: МИСиС, 2005. 432 с.
3. Зуйко И.С. Влияние термомеханической обработки на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства алюминиевого сплава AA2519 / И. С. Зуйко, М. Р. Газизов, Р. О. Кайбышев // ФММ. 2016. Т. 117. № 9; С. 938-951. <https://doi.org/10.1134/S0031918X16090088>.
4. Кайбышев Р.О. Влияние термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства термоупрочняемого сплава системы Al-Cu-Mg-Mn / Р.О. Кайбышев, И.С. Зуйко, М.Р. Газизов, // ТЛС. 2015. № 2. С. 63–75.
5. Zuiko I. Effect of plastic deformation on the ageing behaviour of an Al–Cu–Mg alloy with a high Cu/Mg ratio / I. Zuiko, R. Kaibyshev // MSE: A. 2018. № 737. P. 401–412. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.017>.
6. Бецофен С.Я. Исследование влияния предварительной деформации на упрочняющий эффект старения сплавов системы Al–Cu–Li / С.Я. Бецофен [и др.] // Металлы. 2016. №5. С. 81–88.
7. Chen Y. Strengthening of an Al–Cu–Mg alloy processed by high-pressure torsion due to clusters, defects and defect–cluster complexes / Y. Chen [a. o.], , MSE A. 2015. №627. P. 10–20.
8. Krasnikov V.S. Interaction of dislocation with GP zones or θ'' phase precipitates in aluminum: Atomistic simulations and dislocation dynamics / V.S. Krasnikov [a. o.], Int. J. of Pl. 2020. №125. P. 169–190.
9. Ying P. Effects of pre-strain on Cu-Mg co-clustering and mechanical behavior in a naturally aged Al-Cu-Mg alloy / P. Ying [a. o.] // MSE: A. 2017. №. 704. P. 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.097>.
10. Бер Л.Б. О стадиях старения алюминиевых сплавов / Л.Б. Бер // ТЛС. 2013. №4. С. 66–76.