

**Анна Игоревна Бодякова<sup>1\*</sup>, Иван Сергеевич Зуйко<sup>1</sup>, Марат Разифович Газизов<sup>1</sup>, Александр Андреевич Калининко<sup>1</sup>, Рустам Оскарлович Кайбышев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород, Россия

\*bodyakova-ai@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАБОТКИ НА ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕСЫЩЕННОГО ТВЕРДОГО РАСТВОРА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Cu-Mg

Исследовано влияние температуры обработки на получение пересыщенного твердого раствора на условный предел текучести, предел прочности, относительное удлинение до разрушения и равномерное удлинение авиационного термоупрочняемого алюминиевого сплава Al-Cu-Mg. Установлено, что с ростом температуры обработки увеличиваются как прочностные, так и пластические характеристики материала. Наилучшие механические свойства наблюдаются после обработки на получения пересыщенного твердого раствора при температуре 510 °С и составляют: условный предел текучести – 180 МПа, предел прочности – 395 МПа, относительное удлинение – 25%.

*Ключевые слова:* Термоупрочняемые сплавы, алюминиевые сплавы, механические свойства, обработка на получение пересыщенного твердого раствора, температура обработки

**Anna I. Bodyakova, Ivan S. Zuiko, Marat R. Gazizov, Alexander A. Kalinenko, Rustam O. Kaibyshev**

Belgorod State National Research University (NRU "BelSU"), Belgorod, Russia

## EFFECT OF TEMPERATURE OF SOLID SOLUTION TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF AN Al-Cu-Mg ALUMINUM ALLOY

The effect of the temperature of the solid solution treatment on the yield stress, ultimate tensile stress, elongation to failure, and uniform elongation of a heat-resistance Al-Cu-Mg alloy for aircraft was studied. The strength and plasticity increased with processing temperature. The best combination of mechanical properties was observed after solution treatment at a temperature of 510 °C. The yield stress, ultimate tensile stress, and elongation were achieved at 180 MPa, 395 MPa, and 25%, respectively.

*Key words:* heat resistance alloy, aluminum alloy, mechanical properties, solid solution treatment, temperature.

Алюминиевые сплавы остаются основными материалами, используемыми в аэрокосмической и авиационной промышленности.

Потребность в легких алюминиевых сплавах вызвана, прежде всего, необходимостью снижения веса самолетов, расхода топлива и выбросов ядовитых парниковых газов [1]. Из всех коммерческих алюминиевых сплавов в аэрокосмической промышленности наиболее широко используются сплавы системы Al-Cu-Mg из-за их высокой удельной прочности, хорошей вязкости разрушения и превосходных усталостных свойств [2,3]. Алюминиевые сплавы Al-Cu-Mg являются дисперсионно упрочняемыми сплавами. Настоящая работа посвящена исследованию современной версии дуралюмина, близкого по составу к сплаву АА 2624, который разработан компанией ALCOA, США. Данный сплав может быть использован для замены сплава Д16, который используется при изготовлении компонентов самолетов, таких как нижние панели крыльев, требующие хорошей прочности и высокого сопротивлению разрушения [4].

Химический состав исследуемого сплава представлен в Таблице 1. Слиток был получен на базе НИУ «БелГУ» полунепрерывным литьем с высокой скоростью кристаллизации. Полученный слиток подвергся гомогенизационному отжигу при температуре 375 °С в течение 10 ч с последующим нагревом до 460 °С со скоростью 100 °С/ч и выдержкой при температуре 460 °С 14 ч с последующим охлаждением с печью. Затем слиток был прокован до суммарной степени,  $\varepsilon_{ист.} \approx 2,0$ , при температуре 450 °С и прокатан при температуре 460 °С до  $\varepsilon_{ист.} \approx 1,4$ . Из полученных горячекатаных плит были вырезаны образцы для механических испытаний.

Таблица 1

Химический состав исследуемого алюминиевого сплава

Элемент	Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Zr	Fe	Si
Содержание, вес. %	баланс	3,96	1,18	0,58	0,16	0,14	0,10	0,01	0,02

Обработку на получение пересыщенного твердого раствора (ПТР) проводили при температурах 480 °С, 459 °С и 510 °С. Время выдержки при температуре обработки составляло 2 ч. Охлаждение образцов осуществляли в холодной воде (~20°С). Механические свойства определяли по испытаниям на одноосное растяжение при комнатной температуре на машине Instron 5882 с использованием высокоточного контактного экстензометра MFX 500. Ось растяжения совпадала с осью горячей прокатки. Для каждого состояния было испытано 2 плоских образца с рабочей частью следующих размеров: 3мм\*7мм\*25мм. Скорость деформации была постоянной и составляла 2 мм/мин.

Полученные экспериментальные данные испытания механических свойств Al-Cu-Mg сплава после обработки на получение пересыщенного твердого раствора при различных температурах представлены в Таблице 2. После обработки на получение ПТР при температуре 480 °С условный предел

текучности сплава Al-Cu-Mg составляет 140 МПа. Повышение температуры обработки до 495 °С приводит к росту условного предела текучести на 25 МПа. Температура обработки 510 °С обеспечивает максимальный условный предел текучести в 180 МПа. Повышение условного предела текучести с ростом температуры обработки на ПТР может быть связано с увеличением твердорастворного упрочнения алюминиевой матрицы из-за повышения концентрации меди и магния в пересыщенном твердом растворе алюминия. Предел прочности после обработки на ПТР при температуре 480 °С составляет 360 МПа. Изменение предела прочности с ростом температуры обработки носит аналогичный характер изменению условного предела текучести. После обработки на получение ПТР при 495 °С и 510 °С предел прочности достигает 380 МПа и 395 МПа, соответственно.

Таблица 2

Механические свойства алюминиевого сплава после обработки на получение пересыщенного твердого раствора при температуре 480-510 °С

Температура, °С	Номер образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение до разрушения, %	Равномерное удлинение, %
480	1	135	355	23,0	20,3
	2	140	360	23,9	21,9
	среднее	140±5	360±5	23,5±0,5	21,1±0,8
495	1	170	385	23,9	20,4
	2	160	375	25,7	22,8
	среднее	165±5	380±5	24,8±0,9	21,6±1,2
510	1	170	390	29,0	26,1
	2	185	400	26,4	23,8
	среднее	180±10	395±5	27,7±0,7	25,0±1,1

Относительное удлинение до разрушения (т.е. пластичность) после термической обработки при температуре 480°С составляет 21,1%. С ростом температуры обработки относительное удлинение до разрушения увеличивается и составляет 23,5% после обработки при 495 °С и 25,0% после обработки при 510 °С. При этом образец равномерно удлиняется практически до самого разрушения вне зависимости от температуры обработки.

Разница между пределом прочности и условным пределом текучести в алюминиевом сплаве после обработке на получение ПТР не зависит от температуры обработки и составляет 215-220 МПа. Следовательно, рост равномерного удлинения с повышением температуры термической обработки свидетельствует о снижении коэффициента деформационного упрочнения. Повышение пластичности и снижение коэффициента деформационного

упрочнения может быть следствием растворения первичных частиц кристаллизационного происхождения и роста зёрен при высокотемпературной обработке.

Отметим, что в известной литературе отмечают [5], что повышение температуры обработки сплавов системы Al-Cu-Mg свыше 500 °С может приводить к пережогу сплава, который заключается в оплавлении границ зёрен и дендритов из-за локального оплавления эвтектики. После охлаждения в местах оплавления могут происходить химическая ликвация, формироваться поры и дефекты, что приводит к снижению не только механических свойств, но и коррозионной стойкости данного сплава под напряжением, которая критична ввиду применения дюралей в авиастроение. Поэтому несмотря на высокие механические свойства алюминиевого сплава Al-Cu-Mg после обработки на получения ОТП при температуре 510°С для определения оптимального режима термообработки необходимы дальнейшие исследования коррозионных свойств сплава, которое будет проведено в дальнейшем.

**Заключение.** Исследовано влияние температуры обработки на получение пересыщенного твердого раствора на условный предел текучести, предел прочности и пластичность термоупрочняемого алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg. Повышение температуры термической обработки с 480 °С до 510 °С приводит к одновременному росту прочностных и пластических свойств термоупрочняемого сплава, так что после обработки на ПТР при температуре 510 °С условный предел текучести составляет 180 МПа, предел прочности – 395 МПа, относительное удлинение до разрушения – 25 %. Для определения оптимальной температуры обработки необходимы дальнейшие исследования коррозионных свойств сплава после старения.

*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». Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kabirian F. Negative to positive strain rate sensitivity in 5xxx series aluminum alloys: experiment and constitutive modeling / F. Kabirian, A.S. Khan, A. Pandey // International Journal of Plasticity. 2014. V. 55. P. 232–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.11.001>.
2. Zhang J. Structural, elastic and electronic properties of  $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu) and S (Al<sub>2</sub>CuMg) strengthening precipitates in Al–Cu–Mg series alloys: first-principles calculations / J. Zhang [and etc.] // Solid State Communications. 2012. V. 152. № 23. P. 2100–2104. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2012.09.003>.

3. Wang Y. Dynamic compressive behavior of selected aluminum alloy at low temperature / Y. Wang, Z. Jiang // *Materials Science and Engineering A*. 2012. V. 553. P. 176–180. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.010>.
4. Tihamiyu A. A. Crash-worthiness of a recently-developed AA 2624 aluminum alloy: Experimental studies / A. A. Tihamiyu, A. G. Odeshi, J. A. Szpunar // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. V. 766. P. 138389. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138389>.
5. ASM Handbook Volume 04 - Heat Treating / T. Arai [and etc.]. USA: The Materials Information Company, 1991. 2173 p.

## REFERENCES

1. Kabirian F. Negative to positive strain rate sensitivity in 5xxx series aluminum alloys: experiment and constitutive modeling / F. Kabirian, A.S. Khan, A. Pandey // *International Journal of Plasticity*. 2014. V. 55. P. 232–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.11.001>.
2. Zhang J. Structural, elastic and electronic properties of  $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu) and S (Al<sub>2</sub>CuMg) strengthening precipitates in Al–Cu–Mg series alloys: first-principles calculations / J. Zhang [and etc.] // *Solid State Communications*. 2012. V. 152. № 23. P. 2100–2104. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2012.09.003>.
3. Wang Y. Dynamic compressive behavior of selected aluminum alloy at low temperature / Y. Wang, Z. Jiang // *Materials Science and Engineering A*. 2012. V. 553. P. 176–180. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.010>.
4. Tihamiyu A. A. Crash-worthiness of a recently-developed AA 2624 aluminum alloy: Experimental studies / A. A. Tihamiyu, A. G. Odeshi, J. A. Szpunar // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. V. 766. P. 138389. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138389>.
5. ASM Handbook Volume 04 - Heat Treating / T. Arai [and etc.]. USA: The Materials Information Company, 1991. 2173 p.