

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА AL-CU-MG-AG СПЛАВА

Жемчужникова Д.А., Газизов М.Р., Тагиров Д.В.

ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), Белгород, Россия (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85), e-mail: zhemchuzhnikova@bsu.edu.ru

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния степени предварительной деформации перед старением на механические свойства Al-4,35Cu-0,46Mg-0,63Ag-0,36Mn-0,12Ti (% по массе) сплава при 20 °С и 165 °С. За исходное было принято состояние сплава после литья, гомогенизации и стандартной обработки Т6 – закалка и искусственное старение на максимальную прочность. За деформированное принято состояние сплава после литья, гомогенизации, ступенчатой прокатки и старения. Ступенчатая прокатка заключалась в сочетании горячей прокатки, закалки и холодной прокатки в интервале степеней деформации 5-20%. В работе также были подобраны режимы старения для обоих состояний сплава. Показано, что пластическая деформация повышает микротвердость сплава, смещая пик достижения наибольшей твердости в сторону меньшей выдержки при старении. Кроме того, предварительная деформация перед старением значительно улучшает прочностные характеристики сплава при растяжении как при комнатной, так и при повышенной температурах. Обсуждается влияние степени холодной прокатки перед старением на механические свойства сплава в исследуемом интервале температур.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, старение, деформационно-термическая обработка, механические свойства, микроструктура.

EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF AN AL-CU-MG-AG ALLOY

Zhemchuzhnikova D.A., Gazizov M.R., Tagirov D.V.

Belgorod National Research University, Belgorod, Russia (308015, Belgorod, Pobeda Street, 85), e-mail: zhemchuzhnikova@bsu.edu.ru

The effect of degree of deformation before aging on the mechanical properties of an Al-4.35 Cu-0.46 Mg-0.63Ag-0.36Mn-0.12Ti (% by weight) alloy at 20°C and 165°C was examined. Initially, ingots were subjected casting, homogenization annealing and tradition T6 treatment – quenching and artificial aging for achieve the maximum strength. The ingots after casting and annealing were subjected to rolling and artificial aging. This material will denote as deformed alloy. Step rolling was combined hot rolling, quenching and cold rolling in a range of deformation of 5-20%. In the paper has also been analyzed the conditions of aging for both states of the alloy. It is shown that the plastic deformation increases the microhardness of the alloy to achieve the highest peak shifting to a lower hardness with aging exposure. Furthermore, prior deformation before aging significantly improves the strength characteristics of the alloy in tension at both room and elevated temperatures. The influence of the degree of cold rolling before aging on the mechanical properties of the alloy in the temperature range is investigated.

Keywords: aluminum alloy, aging, heat treatment, mechanical properties, microstructure

Введение

Новые термоупрочняемые алюминиевые сплавы системы Al-Cu-Mg-Ag широко используются в автомобильной и авиационной промышленности благодаря своей высокой прочности, сопротивлению ползучести, вязкости разрушения, значительной усталостной долговечности и низкому весу [1-3; 5; 7-9]. Температурный интервал применения таких сплавов при высоких нагрузках составляет ~ 135-175 °С [5; 8; 9]. В качестве основного вида термической обработки сплавов данной системы применяют искусственное старение, поскольку оно обеспечивает более равновесное состояние материала при температуре

эксплуатации и приводит к получению более стабильных свойств при длительном нагреве [1; 4]. Однако проведение предварительной деформации сплава перед старением позволяет значительно повысить его механические свойства за счет дополнительного образования мест выделений упрочняющих фаз, а, следовательно, их более равномерному распределению [6]. Свойства сплава при рабочей температуре после такого вида обработки изучены мало, поэтому целью данной работы является исследование влияния степени предварительной деформации на механические свойства Al-Cu-Mg-Ag сплава при комнатной и рабочей температурах.

Материал и методы исследования

Используемый в работе алюминиевый сплав с химическим составом Al-4,35Cu-0,46%Mg-0,63Ag-0,36Mn-0,12Ti (в вес. %) был получен методом литья, затем слиток гомогенизировали при 510 °С в течение 24 ч. Это состояние сплава обозначено здесь как исходное. Далее из полученной заготовки вырезали плиты для прокатки. Прокатку проводили при 400 °С до суммарной степени деформации ~ 80%, затем следовала закалка полученных листовых заготовок в воде с температурой 525 °С и временем выдержки 1 ч, и дальнейшая холодная прокатка до степеней деформации 5-20%. Данное состояние сплава обозначено как деформированное. Старение заготовок сплава проводили в интервале температур 180-190 °С и времени выдержки 0,5-48 ч.

Испытания на микротвердость проводили при комнатной температуре, используя микротвердомер Wolpert 402MVD для измерения твердости по Виккерсу и нагрузку 2 Н. Время выдержки образцов под нагрузкой составляло 10 секунд.

Статические испытания на растяжение для определения прочностных характеристик сплава (предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_B), удлинение до разрушения (δ)) проводили на образцах с размером рабочей части 3×7×25 мм в интервале температур 20-165 °С при постоянной скорости деформации $1,3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, используя электромеханическую машину Instron 5882. Ось растяжения параллельна направлению прокатки. Время выдержки каждого образца перед началом испытания при повышенной температуре составляло 10 мин. Перед испытанием поверхность образца полировалась на шлифовальной бумаге с покрытием SiC и шероховатостью 2400# (FEPA). Для получения достоверных результатов испытывали не менее 2 образцов на каждую точку.

Результаты исследования и их обсуждение

Старение сплава в исходном состоянии проводилось в интервале температур 180-190 °С и времени выдержки 0,5-48 ч (рис. 1а). При увеличении времени старения, после достижения максимума, микротвердость сплава непрерывно снижается (рис. 1). Наиболее высокие значения микротвердости сплав демонстрирует после отжига при 180 °С и

выдержке 5 ч и при 190 °С и выдержке 2 ч: 163 HV и 161 HV, соответственно (рис. 1а). Так как технологически более предпочтителен режим с наименьшей выдержкой, за оптимальную температуру отжига была принята 190 °С.

На рисунке 1б приведено исследование влияния степени предварительной холодной прокатки на микротвердость сплава при отжиге при 190 °С. Деформация перед старением не изменила общий вид кривых: с увеличением времени отжига микротвердость сплава повышается, достигает максимума и затем резко снижается (рис. 1б). Однако предварительная холодная деформация в интервале степеней обжатия 5-20% значительно повышает микротвердость исходного сплава. Наибольшие значения твердости для всех степеней прокаток наблюдаются при времени выдержки 1-2 ч, при этом максимальные значения, равные 171,1 HV; 171 HV и 172,9 HV, сплав демонстрирует после предварительной прокатки до 10, 15 и 20% соответственно (рис. 1б).

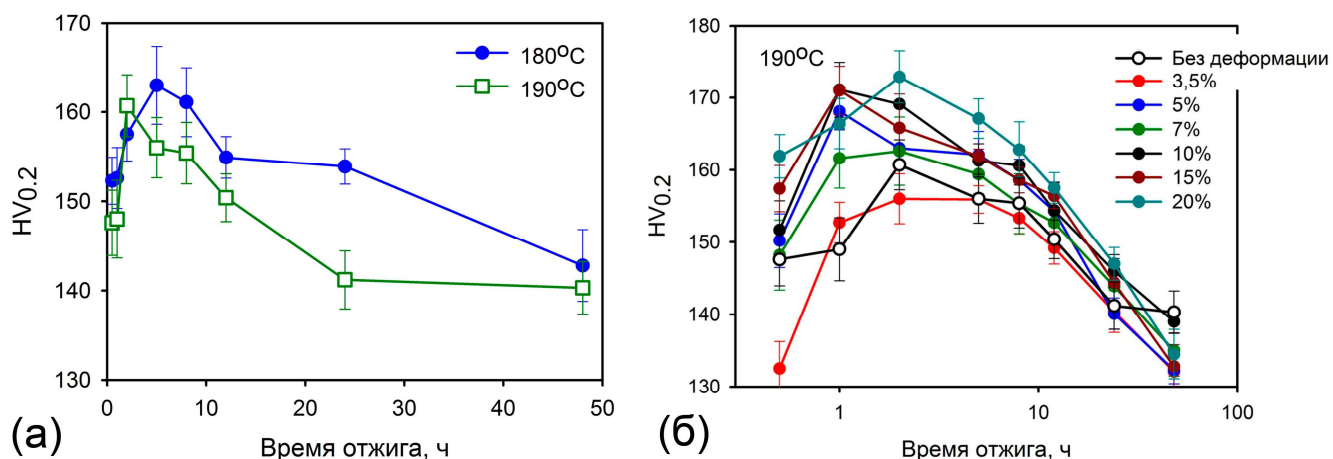


Рисунок 1 – Влияние температуры и времени старения на микротвердость Al-Cu-Mg-Ag сплава в (а) исходном и (б) деформированном состоянии

Исследование механических свойств сплава при растяжении при комнатной температуре представлено на рисунке 2 и в таблице 1. Так как максимальные значения микротвердости наблюдались после выдержек при отжиге в 1-2 ч, то представляло интерес исследование прочностных характеристик образцов сплава после соответствующих термообработок.

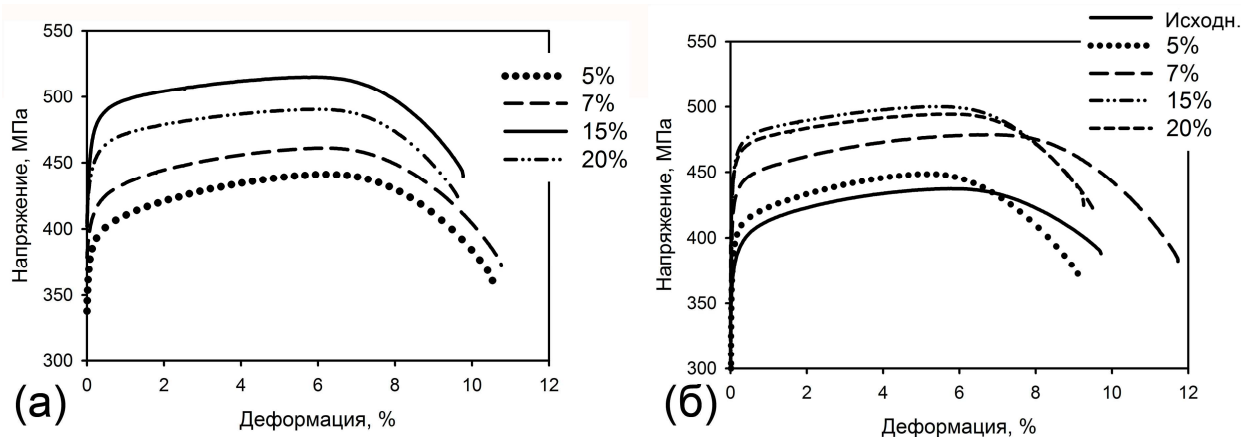


Рисунок 2 – Кривые растяжения при комнатной температуре Al-Cu-Mg-Ag сплава после холодной прокатки до различных степеней и последующего старения при 190 °С в течение:

(а) 1 ч; (б) 2 ч

Таблица 1 – Влияние степени холодной прокатки (ХП) и времени отжига при 190 °С на механические свойства Al-Cu-Mg-Ag сплава

Состояние сплава	Старение при 190 °С, 1 ч			Старение при 190 °С, 2 ч		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Исходное	-	-	-	395	435	10
ХП 5%	390	440	9,5	395	445	10
ХП 7%	410	460	10	415	470	10
ХП 15%	465	510	10,5	465	500	9
ХП 20%	445	490	9,5	455	490	9

Механические свойства сплава в исходном состоянии после старения на максимальную прочность (190 °С, 2 ч) составили: $\sigma_{0,2} = 395$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 435$ МПа и $\delta = 10\%$ (табл. 1). Прокатка со степенью деформации меньше 5% практически не влияет на свойства сплава, в то время как при более высоких степенях наблюдаются пророст прочности и незначительное изменение пластичности сплава (рис. 1, табл. 1). Наиболее высокими значениями механических свойств сплав обладает после прокатки на 15% и старения при 190 °С в течение 1 ч: предел прочности и текучести сплава на 18% выше этих же параметров исходного сплава (рис. 2, табл. 1). Дальнейшее увеличение степени прокатки приводит к снижению прочностных свойств. Стоит также отметить, что, несмотря на сильную зависимость значений микротвердости от времени старения, механические свойства деформированного сплава практически не меняются с увеличением времени выдержки (рис. 2, табл. 1).

В качестве рабочей в данном исследовании выбрана температура 165 °С. Главной особенностью деформационного поведения сплава при этой температуре является его интенсивное разупрочнение после достижения максимального напряжения (рис. 3). Однако даже в этом случае прочность прокатанных на 15-20% образцов выше прочности сплава в исходном состоянии: 420-435 МПа и 380 МПа, соответственно (табл. 2).

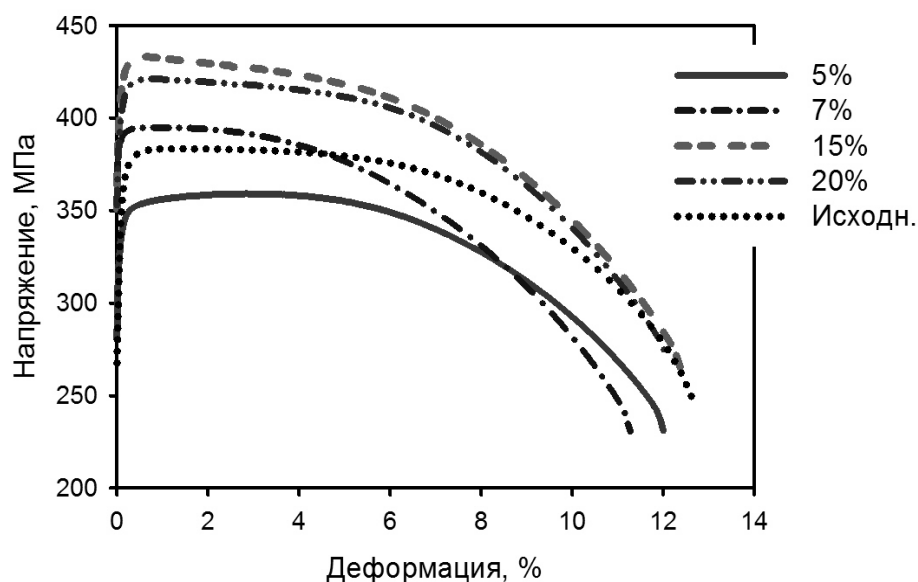


Рисунок 3 – Кривые растяжения при температуре 165 °С Al-Cu-Mg-Ag сплава в исходном состоянии и после прокатки до различных степеней и последующего старения при 190 °С в течение 1 ч

Таблица 2 – Механические свойства при 165 °С Al-Cu-Mg-Ag сплава в исходном состоянии и после ХП и старения при 190 °С в течение 1 ч

Состояние сплава	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Исходное	365	380	12
ХП 5%	355	365	12
ХП 7%	390	395	11
ХП 15%	425	435	13
ХП 20%	415	420	12

Таким образом, на основании представленных результатов исследования можно сделать вывод о том, что предварительная деформация перед старением позволяет значительно повысить прочностные характеристики Al-Cu-Mg-Ag сплава без потери пластичности как при комнатной, так и при повышенной температурах.

Выводы

1. В исходном состоянии максимальные механические свойства Al-Cu-Mg-Ag сплав демонстрирует после отжига при 190 °С в течение 2 ч: микротвердость равна 161 HV, $\sigma_{0,2} = 200$ МПа, $\sigma_b = 340$ МПа и $\delta = 16\%$.
2. Прокатка в интервале степеней деформации 10-15% и последующее старение при 190 °С в течение 1 ч позволяет повысить микротвердость исходного сплава на 10-12 HV, при этом максимальное увеличение механических свойств при комнатной температуре сплав демонстрирует после прокатки до степени деформации 15%.
3. Повышение температуры растяжения до 165 °С приводит к интенсивному разупрочнению сплава при увеличении деформации, однако даже в этом случае прочность материала, деформированного на 15-20%, выше прочности исходного сплава и составляет 420-435 МПа.

Результаты работы были получены на оборудовании Центра коллективного НИУ БелГУ в ходе выполнения комплексного проекта ФГБОУ ВПО «УГАТУ» и ОАО «УМПО» «Разработка и промышленное освоение координируемых технологий высокоточного формообразования и поверхностного упрочнения ответственных деталей из Al-сплавов с повышенной конструкционной энергоэффективностью», реализуемого в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 года.

Список литературы

1. Телешов В.В., Головлева А.П. Влияние малых добавок серебра и параметров технологии изготовления на структуру и свойства полуфабрикатов из сплавов системы Al-Cu-Mg-Ag-Xi (Обзор отечественной и зарубежной литературы) // Технология легких сплавов. – 2006. - № 1-2. – С. 99-119.
2. Bakavos D., Prangnell P.B., Bes B., Eberl F. The effect of silver on microstructural evolution in two 2xxx series Al-alloys with a high Cu:Mg ratio during ageing to a T8 temper // Mater.Sci.Eng. A. – 2008. - V. 491. – P. 214–223.
3. Chang Y.C., Howe J.M. Composition and stability of Ω phase in an Al-Cu-Mg-Ag alloy // Metall. Trans. A. – 1993. - V. 24A. – P. 1461-1470.
4. Lumley R.N., Morton A.J., Polmear I.J. Enhanced creep resistance in underaged aluminum alloys // ICAA7. – 2000. – P. 1495–1500.
5. Polmear I.J., Couper M.J. Design and development of an experimental wrought aluminium alloy for use at elevated temperatures // Metall. Trans. A. – 1988. - 19A. – P. 1027–1035.
6. Ringer S.P., Muddle B.C., Polmear I.J. Effects of cold work on precipitation in Al-Cu-Mg-(Ag) and Al-Cu-Li-(Mg-Ag) alloys // Met. and Mater. Trans. A. – 1995. – 26 A, № 7. – P. 1659–1671.

7. Ringer S.P., Sakurai T., Polmear I.J. Origins of hardening in aged Al-Cu-Mg-(Ag) alloys // Acta Mater. – 1997. - V. 45. – P. 3731-3744.
8. Teleshov V.V. A study of the properties of semiproducts from high-temperature aluminum alloys in the state of maximum permissible softening // Metal Science and Heat Treatment. – 2001. - Vol. 43, Nos. 5-6. – P. 27-34.
9. Teleshov V.V. Temperature ranges of phase transformation and mechanical properties of alloys of the Al–Cu–Mg–Ag system with various Cu: Mg ratios // Metal Sci. and Heat Treat. – 2005. - V. 47. – P. 139-144.

Рецензенты:

Кайбышев Р.О., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Материаловедение и нанотехнологии», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», руководитель лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород.

Салищев Г.А., д.т.н., профессор, руководитель лаборатории объемных наноструктурных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород.