

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ КРИОКАТАНЫЕ ЛИСТЫ ИЗ СПЛАВА Д16 С УНИКАЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ

Крымский С.В., Ситдиков О.Ш., Автокротова Е.В., Маркушев М.В.
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Россия,
stkr_imspp@mail.ru

Разработка новых методов упрочнения металлов и сплавов за счет «пластического наноструктурирования» вызвала в последние годы заметный интерес к деформированию при криогенных температурах. Основанием послужил довольно значимый эффект упрочнения обрабатываемых материалов. Однако до сих пор не определены пределы их упрочнения, обеспечивающие наибольшую надежность и долговечность конструкций. Этот вопрос актуален для сплавов на различных основах, в том числе, и для сложнелегированных дисперсионно-твердеющих алюминиевых сплавов типа дуралюмин, широко используемых в различных отраслях промышленности, в том числе аэрокосмической.

Цель работы – оценить эффект обработки, совмещающей криогенную деформацию и упрочняющую термообработку, на структуру, статическую прочность, трещиностойкость и сопротивление межкристаллитной коррозии (МКК) алюминиевого сплава Д16.

В работе использовали промышленный горячепрессованный прутки $\varnothing 60$ мм сплава Д16 стандартного химического состава (Al-4,4Cu-1,4Mg-0,7Mn, % вес.) с грубоволокнистой структурой. Заготовки в виде пластин толщиной 5 мм, вырезанные вдоль оси прессования, сначала нагревали до температуры 500 °С и закаливали в воду комнатной температуры для фиксации пересыщенного алюминиевого твердого раствора. Затем заготовки охлаждали и прокатывали с суммарной степенью деформации $\epsilon \sim 2$ в изотермических условиях при температуре жидкого азота, после чего отжигали (старили) при температуре от комнатной до 190°С. Для сравнения, криопрокатанный (КП) сплав также подвергали стандартным видам термического упрочнения по режимам Т и Т1 – перезакалке и последующему естественному и искусственному старению (ЕС и ИС) при комнатной и температуре 190°С, 6 суток и 12 часов, соответственно.

Структуру и фазовый состав сплава анализировали методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии (ОМ и ПЭМ). Микроструктуру изучали с помощью микроскопа Nikon L-150 на механически полированных и протравленных реактивом Келлера шлифах. Тонкую структуру исследовали в электронном микроскопе JEOL 2000EX на объектах, полученных струйной электрополировкой в 30% растворе азотной кислоты в метаноле. Механические испытания проводили при комнатной температуре на машине Instron 5982. Параметры статической прочности сплава при одноосном растяжении (условные пределы прочности и текучести ($\sigma_{0,2}$ и σ_b) и относительное удлинение (δ)) определяли на плоских образцах с рабочей частью 9x3x0,7 мм. Характеристики трещиностойкости (удельную работу зарождения и роста трещины (A_3 и A_p) и их сумму (A)) оценивали по методу Кана при внецентренном растяжении образцов толщиной 0,7 мм с боковым V-образным концентратором. Анизотропию механических свойств оценивали по результатам испытаний не менее трех долевых (ДП) и поперечных (ПП) образцов на точку. Испытания на сопротивление МКК проводили по ГОСТ 9.021-74. Образцы выдерживали в течение 24 часов в водном растворе, содержащем 3% NaCl и 1% HCl. Коррозионное поражение анализировали в направлении прессования/прокатки вдоль контактной поверхности – поперечного сечения прутка/листа.

Обнаружено, что криопрокатка и последующее естественное старение сплава в течение ~ 6 суток приводили к фиксации уникально высокой прочности (вдоль направления прокатки $\sigma_{0,2} = 590$ МПа, $\sigma_b = 640$ МПа), сопровождаемой, однако, лишь удовлетворительной пластичностью ($\delta = 5,9$ %) и низкой трещиностойкостью, в особенности, низким сопротивлением росту трещины ($A_3 = 27$ кДж/м², $A_p = 4$ кДж/м²). При этом глубина и интенсивность МКК (35 мкм и 14 %) чуть превышали уровни,

зафиксированные для исходного прутка. Такой результат был, прежде всего, достигнут за счет структурного упрочнения от формирования при криопротатке развитой наночаеистой структуры (размер ячеек 100-200 нм) [1-3], а также, - за счет зонного распада предварительно пересыщенного алюминиевого раствора, активно протекавшего в сильнодеформированной матрице [2-4]. Искусственное же старение прокатанного сплава по серийному режиму Т1 привело к заметному его разупрочнению ($\sigma_{0,2} = 405$ МПа, $\sigma_b = 465$ МПа), причем практически до уровня, достигаемого лишь в результате дисперсионного твердения исходного полуфабриката. Причина - наложение и интенсивное протекание процессов распада твердого раствора, возврата и рекристаллизации деформационной структуры [3-6]. В результате, несколько неожиданным было зафиксировать тот факт, что эффект упрочнения сплава, обусловленный интенсивной низкотемпературной пластической деформацией, терялся даже при отжигах при температурах и длительностях, соответствующих стандартным режимам искусственного старения. Кроме того, несмотря на сильное разупрочнение, показатели пластичности и трещиностойкости прокатанного сплава повышались лишь незначительно ($\delta = 7$ %, $A_3 = 31$ кДж/м², $A_p = 9$ кДж/м²), а сопротивление МКК, напротив, заметно ухудшалось (глубина и интенсивность 475 мкм и 88 %, соответственно). Таким образом, стандартное искусственное старение сводило на нет все усилия, направленные на повышение свойств сплава за счет деформационной обработки.

Таблица 1 - Механические свойства сплава Д16 при комнатной температуре

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	A , кДж/м ²	A_{3T} , кДж/м ²	A_{pT} , кДж/м ²
Т (З + ЕС)*	280/-	430/-	19,0/-	-	-	-
Т1 (З + ИС (190°С, 12 ч))	390/-	440/-	7,0/-	-	-	-
КП + ЕС (6 суток)	590/505	640/540	5,9/2,0	31/16	27/13	4/3
КП + ИС (190°С, 12 ч)	405/405	465/455	7,1/2,9	40/17	31/13	9/4
КП + Т	285/270	455/430	27,8/20,3	243/128	94/48	149/80
КП + Т1	375/365	465/450	12,0/8,6	138/46	90/28	48/18
КП + ИС (корр.)	610/510	665/550	10,4/3,1	60/23	42/18	18/5

* КП – криопротатка, З – закалка, ЕС и ИС – естественное и искусственное старение

Исправить ситуацию позволила корректировка режимов искусственного старения криопротатанного сплава. С ее помощью удалось не только значительно повысить параметры пластичности ($\delta = 10,4$ %) и трещиностойкости ($A_3 = 42$ кДж/м², $A_p = 18$ кДж/м²), но и дополнительно его упрочнить ($\sigma_{0,2} = 610$ МПа, $\sigma_b = 665$ МПа), сохранив приемлемый уровень сопротивления МКК (глубина и интенсивность 50 мкм и 23 %, соответственно). То есть, придать сплаву уникальный комплекс механических свойств, определяющих его конструкционную прочность в условиях статического нагружения при комнатной температуре. Такой комплекс свойств обеспечивается сочетанием эффектов структурного упрочнения от криопротатки и дисперсионного твердения от пост-деформационного старения. При этом, эффект достигается за счет искусственного старения при более низких температурах, чем при стандартной упрочняющей термообработке сплава на максимальную прочность. Дополнительное упрочнение криопротатанного сплава обусловлено меньшей интенсивностью возврата структуры деформированной матрицы и преимущественно зонным распадом пересыщенного твердого раствора с формированием продуктов в виде нанометрических зон и пластинчатых частиц метастабильных фаз, равномерно распределенных на элементах дислокационной структуры.

Обращает на себя внимание также то, что сплав после криопротатки и старения по скорректированному режиму, т.е. в состоянии, в котором он демонстрировал

уникально высокую прочность и наилучшее сочетание прочности и пластичности при одноосном растяжении, показал уровень обоих параметров трещиностойкости выше достигаемого после криопрокатки и старения по серийным режимам. Кроме того, сплав во всех состояниях, кроме состояния КП+Т, показал работу зарождения трещины значительно выше работы, затрачиваемой на ее распространение. Если принять во внимание абсолютные значения установленных параметров механического поведения, то можно заключить, что криопрокатанный сплав после искусственного старения по скорректированному режиму на фоне уникальной прочности обладает не просто удовлетворительной, а хорошей трещиностойкостью. А рассматривая демонстрируемый уровень свойств сплава в целом, можно говорить о том, что он обладает и уникальным балансом прочности, пластичности, трещиностойкости и сопротивления межкристаллитной коррозии.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН по теме «Интенсивно-деформированные алюминиевые сплавы: структура, технологические и эксплуатационные свойства», регистрационный номер АААА-А19-119021390107-8. Экспериментальные исследования выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Avtokratova, S. Krymskiy, A. Mikhaylovskaya, O. Sitdikov, M. Markushev. Nanostructuring of 2XXX Aluminum Alloy Under Cryorolling to High Strains // Materials Science Forum, 2016, V. 838-839, P. 367-372;
2. Крымский С.В., Автократова Е.В., Ситдииков О.Ш., Михайловская А.В., Маркушев М.В.. Структура алюминиевого сплава Д16 криопрокатанного с различной степенью // Физика металлов и металловедение, 2015, Т. 116, № 7, С. 714-723;
3. Krymskiy S., Sitdikov O., Avtokratova E., Murashkin M., Markushev M. Strength of cryorolled commercial heat hardenable aluminum alloy with multilevel nanostructure// Reviews on Advanced Materials Science, 2012, V. 31, P. 145-150;
4. Автократова Е.В., Крымский С.В., Маркушев М.В., Ситдииков О.Ш. Особенности структуры алюминиевого сплава Д16, интенсивно деформированного при температуре жидкого азота // Письма о материалах, 2011, Т. 1, № 2, С. 92-95;
5. Крымский С.В., Ильясов Р.Р., Автократова Е.В., Ситдииков О.Ш., Маркушев М.В. Межкристаллитная коррозия криопрокатанного и состаренного алюминиевого сплава Д16 // Физикохимия поверхности и защита материалов, 2017, Т. 53, № 6, С. 646-655;
6. Markushev M.V., Krymskiy S.V., Ilyasov R.R., Avtokratova E.V., Khazgalieva A.A., Sitdikov O.Sh. Influence of Zr on intergranular corrosion of cast and cryorolled D16 aluminum alloy // Letters on materials, 2017, V. 7 (4), P. 447-451.