

Д. А. Жемчужникова, Р. О. Кайбышев

НИУ «Белгородский государственный университет», г. Белгород
zhemchuzhnikova@bsu.edu.ru

И. Г. Бродова

Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург

СВОЙСТВА AL-MG-SC СПЛАВА ПРИ КОМНАТНОЙ И КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРАХ: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРЕН

АННОТАЦИЯ

В работе исследовано влияние размера зерен на статические и динамические свойства Al-Mg-Sc сплава при комнатной и криогенных температурах. Различные структурные состояния сплава получали методами горячей прокатки и равноканального углового прессования. Показано, что измельчение зеренной структуры приводит к значительному повышению прочностных характеристик сплава во всем исследуемом интервале температур деформации. Кроме этого, проведение горячей деформации способствует подавлению хрупкого-вязкого разрушения сплава при отрицательных температурах.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, размер зерна, горячая прокатка, равноканальное угловое прессование.

ABSTRACT

In this study, the effect of grain size on the mechanical properties of an Al-Mg-Sc alloy at room and cryogenic temperatures was investigated. Different structural states of the alloy were obtained by hot rolling and equal channel angular pressing. It was shown that intensive grain refinement significantly increases strength at the entire temperature range. In addition, hot deformation leads to suppression of brittle-ductile transition of alloy at cryogenic temperatures.

Key words: aluminium alloy, grain size, hot rolling, equal channel angular pressing.

Способность Al-Mg-Sc сплавов сохранять пластичность вплоть до криогенных температур послужили основой для их широкого использования при изготовлении низкотемпературного оборудования [1; 2]. Тем не менее, непрерывное усовершенствование используемых конструкций и стремление снизить расходы на эксплуатацию, обслуживание и ремонт, улучшение экономичности и характеристик изделия приводят к поиску дополнительных возможностей повысить

комплекс свойств материала. Одним из возможных решений этой задачи является формирование в сплавах мелкозернистой структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [3; 4]. Однако на сегодняшний день влияние такой структуры на свойства сплава в области низких температур изучено слабо. Вышеуказанные обстоятельства обусловили цель и задачи данной работы.

В качестве объекта исследования был выбран алюминиевый сплав системы Al-Mg-Sc (Al-6%Mg-0,39%Mn-0,2%Sc-0,08%Zr-0,06%Cr-0,06%Ti), полученный методом полунепрерывного литья с последующей гомогенизацией при температуре 360°C в течение 12 ч. Это состояние сплава обозначено здесь как исходное. Горячая прокатка (ГП) проводилась при температуре 360 °С с суммарной степенью деформации ~ 75 %. Образование и раскрытие трещин в процессе прокатки не наблюдалось. Мелкозернистую структуру в заготовках сплава получали методом равноканального углового прессования (РКУП) при 320 °С в 12 проходов по маршруту Вс [5]. Характеристики статической прочности и пластичности (предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_B) и относительное удлинение (δ)) измеряли при растяжении плоских образцов с размерами рабочей части 3×7×25 мм, вырезанных вдоль направления последнего прохода деформации. Испытания проводили на электромеханической машине Instron 5882 в интервале температур -196...20 °С и скорости деформирования 2 мм/мин. Исследования микроструктуры проводили с помощью электронного микроскопа FEI Quanta 600 на образцах после механической шлифовки, полировке и травления стандартным раствором Келлера. Белые и черные линии на EBSD картах указывают на мало- (от 2 до 15°) и высокоугловые (свыше 15°) границы, соответственно. Испытания на ударную вязкость проводили на стандартных образцах с концентратором вида U (тип образца I) согласно ГОСТ 9454–78 в указанном температурном интервале.

Микроструктура сплава в исходном состоянии состояла из крупных равноосных зерен со средним размером ~ 22 мкм (рис. 1, а) [6]. Результаты EBSD-анализа показали, что средний угол разориентировки сплава в этом состоянии составил 38°, доля большеугловых границ ~ 87 %. ГП при 360 °С с суммарной степенью деформации 75 % привела к вытягиванию исходных зерен вдоль направления деформации, средний размер зерен в продольном и поперечных направлениях составляет ~ 52 мкм и 6 мкм, соответственно (рис. 1, б). Плотность дислокаций после прокатки увеличилась в ~ 11 раз по сравнению с исходным состоянием и составляла $4 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$. Около 83% границ сплава после ГП имеют малоугловую разориентировку со средним углом 10° (рис. 1, б) [6]. РКУП привело к значительному (~ в 35 раз) измельчению зеренной структуры литого сплава: средний размер рекристаллизованных зерен составил ~ 0,6 мкм, их объемная доля ~ 90 % (рис. 1, в). Средний угол разориентировки, доля большеугловых границ и плотность дислокаций в результате интенсивной

пластической деформации изменились незначительно и составили 38°, 84 % и $4 \times 10^{12} \text{ м}^{-2}$, соответственно.

Влияние температуры на статические и динамические свойства сплава до и после РКУ прессования представлены на рис. 2. В исходном сплаве напряжение течения увеличивается с понижением температуры, в то время как значение удлинения до разрушения растет до $-120 \text{ }^\circ\text{C}$, а при большем охлаждении значительно уменьшается (рис. 2, а).

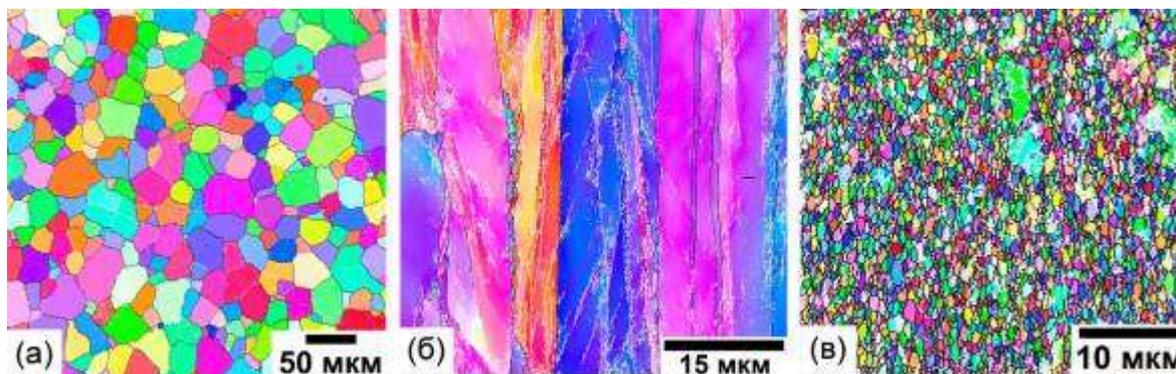


Рис. 1. Микроструктура Al-Mg-Sc сплава в (а) исходном состоянии; (б) после ГП и (в) после РКУП

Проведение горячей деформации методами ГП и РКУП привело не только к существенному увеличению прочностных характеристик сплава во всем исследуемом интервале температур деформации, но и к значительному увеличению пластичности при низкой температуре – удлинение до разрушения сплавов после ГП и РКУП в 2 раза выше исходного материала (рис. 2, б, в). Примечательной особенностью поведения сплава с мелкозернистой структурой является и так называемые площадка и зуб текучести на деформационной кривой (рис. 2, в). При $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ на деформационных кривых сплава наблюдается эффект Портевена-Ле Шателье – прерывистая текучесть, связанная с деформационным старением [7].

На кривых температурной зависимости ударной вязкости сплава в исходном состоянии и после РКУП наблюдается так называемый хрупко-вязкий переход (ХВП) в интервале температур $-110 \dots -60 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2, г). Однако РКУП обеспечивает повышение ударной вязкости сплава при комнатной температуре примерно в 2 раза. При $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ вязкость разрушения мелкозернистого сплава в 4 раза выше, чем у крупнозернистого материала (рис. 2, в). ХВП на кривой «температура- ударная вязкость» сплава после ГП не обнаруживается и происходит постепенное уменьшение значений КСУ в криогенной области (рис. 2, г).

Таким образом, уменьшение размера зерен сплава способствует значительному повышению его прочностных свойств и пластичности в области низких температур, а также увеличению вязкости разрушения как при комнатной, так и при криогенных температурах. Кроме того,

проведение горячей прокатки обеспечивает подавление хрупко-вязкого перехода при понижении температуры деформации сплава.

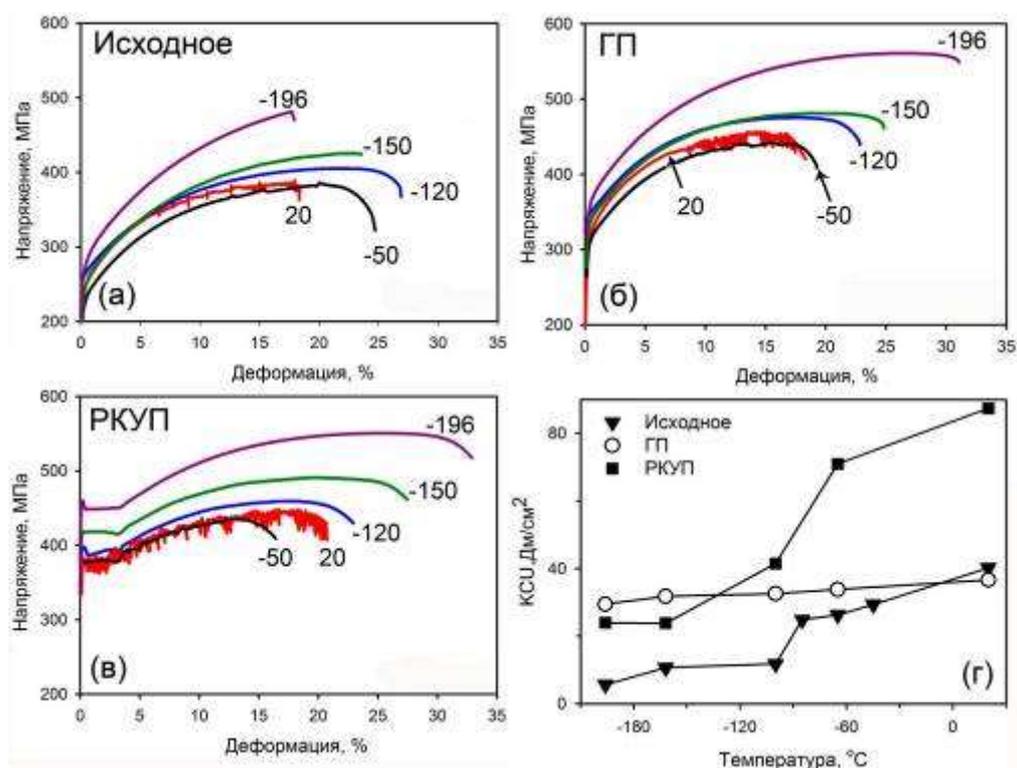


Рис. 2. Влияние температуры (в °С) на кривые напряжение-деформация (а–в) и ударную вязкость (г) сплава в различных состояниях

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, РФФИ (проект №15-38-50458).

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г. А., Фаткина А. М., Толкачева О. А.. Свойства цветных металлов, применяемых в криогенной технике. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 44 с.
2. W. S. Park, M. S. Chun, M. S. Han, M. H. Kim, J. M. Lee / Mater. Sci Eng. A – 2011. – Vol. 528. — P. 5790.
3. R. Song, D. Ponge, D. Raabe, Acta Mater. – Vol. 53 (2005). – P. 4881.
4. J. W. Morris, Science, – Vol. 320 (2008). – P. 1022.
5. R. Z. Valiev, T. G. Langdon, Progr. Mater. Sci. – Vol. 51 (2006). – P. 881.
6. D. Zhemchuzhnikova, A. Mogucheva, R. Kaibyshev, Mater. Sci. Eng. A – Vol. 565 (2013). – P. 132.
7. Brechet, Y. Estrin, Acta Metall. Mater. – Vol. 43 (1995). – P. 955–963.