

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Ю.Д. Корягин, М.А. Смирнов, С.С. Чернов, Н.Т. Карева

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINIUM-MAGNESIUM-LITHIUM ALLOYS SUBJECTED TO THERMOMECHANICAL TREATMENT

Yu.D. Koryagin, M.A. Smirnov, S.S. Chernov, N.T. Kareva

Термомеханическая обработка легких алюминиевых сплавов с литием обеспечивает повышение их прочностных характеристик. Наибольший эффект наблюдается при использовании деформации в районе температур оптимального старения. При этом снижаются характеристики пластичности. Горячая деформация в схеме ТМО одновременно улучшает усталостную прочность и вязкость обоих сплавов, ослабляя интеркристаллитное охрупчивание.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, термомеханическая обработка, прочность, пластичность, интеркристаллическое охрупчивание.

Thermomechanical treatment of light aluminium alloys containing lithium increases their strength. The greatest effect is observed if deformation is performed at optimal aging temperatures. Plasticity characteristics are decreased. Hot deformation in TMT regime improves both fatigue resistance and toughness of the alloys suppressing intercrystalline embrittlement.

*Keywords:* aluminium alloys, thermomechanical treatment, strength, plasticity, intercrystalline embrittlement.

При исследовании промышленных алюминиевых сплавов Д1, Д16 и сплава АК6, а также высокопрочного сплава В95 было установлено, что характер влияния термомеханической обработки на свойства исследованных дисперсионно твердеющих сплавов зависит как от её температурно-деформационного режима, так и от специфики легирования сплавов [1, 3,4]. Низкотемпературная термомеханическая обработка наиболее значительно упрочняет сплавы средней прочности (Д1, Д16, АК6) и в меньшей мере высокопрочный сплав (В95).

Высокотемпературная термомеханическая обработка с деформацией прокаткой на 25...30% при температуре гомогенизации или несколько ниже её, хотя и значительно слабее, чем НТМО, но вполне ощутимо (на 7... 15%) повышает прочностные свойства алюминиевых сплавов средней прочности и не оказывает заметного влияния на упрочнение высокопрочного сплава (В95).

В настоящей работе рассмотрено влияние термомеханической обработки на структуру и свойства алюминий-магний-литиевых сплавов 1420 и 1421. Эксперименты осуществляли на образцах размерами 15x15x140 мм, вырезанных из штамповок, полученных из слитков промышленных сплавов сплава 1420 химического состава (мас. %): 5,26% Mg; 2,06% Li; 0,05% Mn; 0,069% Si;

0,073 % Fe; 0,096 % Zr; 0,018 % Cu; 0,01 % Ti, остальное - алюминий) и сплава 1421 (5,29% Mg; 2,20 % Li; 0,06 % Mn; 0,14 % Si; 0,11 % Fe; 0,15 % Zr; 0,21 % Sc; остальное - алюминий).

Отметим, что сплав 1420 являлся промышленным сплавом системы Al-Li-Mg и изучен достаточно подробно [1, 2, 5 и др.]. С 1985 года серийном производстве находится алюминий-магний-литиевый сплав 1421, отличающийся от сплава 1420 наличием добавки скандия [2, 6 и др.]. Этот сплав характеризуется повышенной прочностью, особенно пределом текучести, высоким сопротивлением повторным нагрузкам и лучшей свариваемостью, чем сплав 1420. Как известно [2, 6 и др.] в сплав 1421 скандий вводится совместно с цирконием, который значительно растворяется в фазе Al<sub>3</sub>Sc.

Деформация образцов изученных сплавов при термомеханической обработке, в основных экспериментах, осуществлялась прокаткой со степенями 15 и 30 % и скоростью 1 с<sup>-1</sup> в интервале температур 20...450 °С. Для всех вариантов обработки гомогенизация проводилась при 450 °С с выдержкой 1,5 часа после прогрева садки. Прокатке при 20...300 °С подвергали предварительно закаленные образцы. Высокотемпературную деформацию проводили при температуре нагрева под закалку (450 °С), а также после подстуживания до 400 °С.

Пластическая деформация при всех изучен-

ных температурах (20...450 °С) по сравнению с закаленным недеформированным состоянием привела к повышению твердости сплавов (рис. 1). Максимальное упрочнение обеспечила деформация, проводимая в температурном интервале интенсивного развития процессов старения (150..170 °С).

Деформация при температуре гомогенизации (450 °С) дает сравнительно небольшое упрочнение. При этой обработке процессы рекристаллизации оказались практически полностью подавленными, а на границах зерен формировалась зубчатость, характерная для ВТМО (рис. 2).

Снижение температуры деформации до 400 °С сопровождалось некоторым понижением

твердости. Одновременно наблюдалось изменение параметра решеток твердых растворов и удельного электросопротивления (табл. 1).

Изменение параметра решетки и удельного электросопротивления подтверждает наличие распада пересыщенного твердого раствора сплавов 1420 и 1421 при холодной деформации и, в большей мере, при нагреве и прокатке в интервале 150...170 °С (см. табл. 1).

Свойства сплавов 1420 и 1421 изучали после искусственного старения при температурах 150 и 170 °С с выдержками до 24 и 12 ч соответственно.

Установлено, что, старение закаленных и деформированных при всех исследованных темпера-

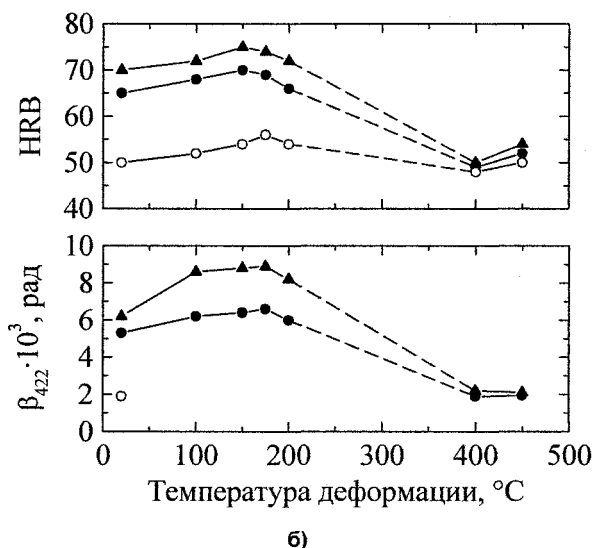
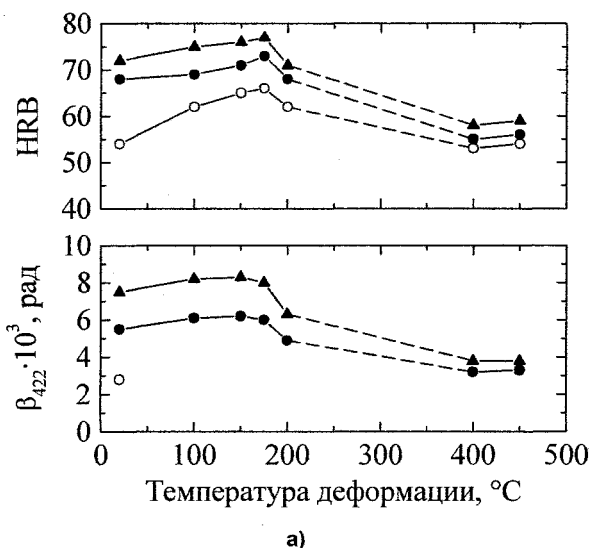


Рис. 1. Зависимость твердости и физического уширения линии (422)<sub>α1</sub> сплавов 1420 (а) и 1421 (б) от температуры деформации: ▲ — деформация 30 %; ● — деформация 15 %; ○ — без деформации

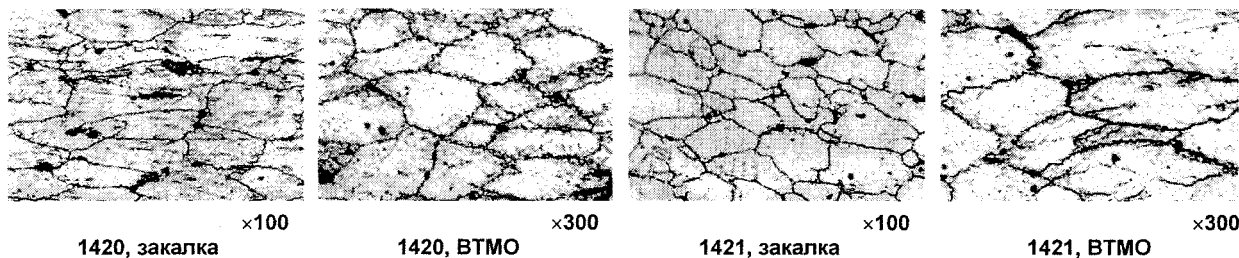


Рис. 2. Микроструктура сплавов 1420 и 1421 после закалки и ВТМО

Изменение параметра решетки твердого раствора (a) и удельного электросопротивления (ρ) сплавов 1420 и 1421 в зависимости от температуры деформации

Параметры	Закалка	Деформация				
		20 °С, 15 %	20 °С, 30 %	150 °С, 30 %	170 °С, 30 %	450 °С, 30 %
a, нм	0,4075	0,4074	0,4073	0,4070	0,4069	0,4076
	0,4065	0,4064	0,4063	0,4062	0,4063	0,4066
ρ, мкОм·м	0,1288	0,1273	0,1262	0,1226	0,1231	0,1295
	0,1250	0,1232	0,1214	0,1182	0,1185	0,1271

Примечание. В числителе приведены значения для сплава 1421, в знаменателе – для сплава 1420.

турах образцов сплава 1420 при 150 °С сопровождается повышением прочностных характеристик вплоть до 24 часов выдержки. Для закаленного сплава 1421 максимум упрочнения при 150 °С соответствует 16...24-часовой выдержке. Холодная и теплая деформации этого сплава, ускоряя процессы распада пересыщенного твердого раствора, смещают максимум прочностных характеристик в сторону меньшей продолжительности выдержки (к 12 ч). Повышение температуры старения до 170 °С и увеличение длительности выдержки до 24 ч не приводит к понижению значений пределов прочности и текучести закаленного сплава 1420. Для деформированных образцов максимальные значения прочностных характеристик достигаются при длительности выдержки 12 ч.

Обращает на себя внимание также относительно небольшое изменение свойств сплавов, подвергнутых НТМО, с увеличением продолжительности старения в пределах исследованных выдержек. Это в некоторой мере обусловлено высокой исходной прочностью, но главная причина заключается, видимо, в том, что интенсивное развитие процессов старения и роста прочностных свойств наблюдается в ходе обработки и на начальных стадиях выдержки.

Важно отметить, что при использовании деформации при 150 °С формируется более благоприятное соотношение между прочностными характеристиками, пластичностью и ударной вязкостью, чем при холодном наклепе. Следует подчеркнуть, что упрочнение сплава 1421 при НТМО больше, чем сплава 1420.

Наибольшее повышение прочностных свойств как сплава 1420, так и 1421 обеспечивает прокатка при 150 °С с обжатием 30 % (табл. 2). После такой обработки значения пределов текучести и прочности сплава 1420 повышаются на 35...50 МПа (8...12 %) и 13...35 МПа (2...7 %) соответственно. Пределы текучести и прочности сплава 1421 возрастают на 60...66 МПа (13,5... 15 %) и 54...57 МПа (9... 11%) соответственно. Упрочнение сплавов при НТМО сопровождается снижением относительного удлинения ( $\delta$ ) на 33 и 26 % (сплав 1420); 49 и 42 % (сплав 1421), а также уменьшением КСВ на 37...44% (холодная деформация) и 18...22% (деформация при 150 °С). Важно отметить, что при использовании деформации при 150 °С формируется более благоприятное соотношение между прочностными характеристиками, пластичностью и ударной вязкостью, чем при холодном наклепе. Следует подчеркнуть, что упрочнение сплава 1421 при НТМО больше, чем сплава 1420.

ВТМО, хотя и значительно слабее, чем НТМО, но вполне ощутимо повышает прочностные свойства сплавов 1420 и 1421: по сравнению с недеформированным состоянием пределы текучести и прочности возрастают на 15...20 МПа, т.е. на 2,5...4,5%. Одновременно после такой обработки увеличивается пластичность на 6...23 % и ударная вязкость на 14...28 %.

Исследование поверхности разрушения ударных образцов сплавов 1420 и 1421 показало, что развитие трещин происходит как по телу, так и по границам зерен. Соответственно изломы состояли из участков транс- и интеркристаллитного разру-

Таблица 2  
Механические свойства сплава 1420 и 1421 после старения по оптимальным режимам

Обработка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	КСВ, кДж/м <sup>2</sup>
450 °С – 1,5 ч, вода + + 170 °С – 12 ч	<u>520</u> 541	<u>402</u> 424	<u>6,8</u> 10,0	<u>86</u> 65
24 ч	<u>525</u> –	<u>405</u> –	<u>6,4</u> –	<u>82</u> –
450 °С – 1,5 ч, вода + деф. 30 % при 20 °С + + 170 °С – 12 ч	<u>542</u> 595	<u>440</u> 493	<u>4,6</u> 5,0	<u>55</u> 37
24 ч	<u>530</u> –	<u>425</u> –	<u>4,6</u> –	<u>60</u> –
450 °С – 1,5 ч, вода + деф. 30 % при 150 °С + + 170 °С – 12 ч	<u>550</u> 600	<u>450</u> 495	<u>5,0</u> 5,6	<u>70</u> 51
24 ч	<u>538</u> –	<u>440</u> –	<u>5,2</u> –	<u>73</u> –
450 °С – 1,5 ч, деф. 30 %, вода + + 170 °С – 12 ч	<u>535</u> 560	<u>425</u> 455	<u>8,4</u> 10,4	<u>98</u> 85

Примечание. В знаменателе приведены значения для сплава 1421.

шения, причем последние, как правило, связаны с вторичными трещинами. ВТМО не изменила характера разрушения образцов исследованных сплавов при динамическом нагружении, однако существенно уменьшила количество ярко выраженных зернограничных фасеток.

Дополнительно оценивалось также влияние ВТМО на малоцикловую усталость сплава 1421. Испытания при малоцикловой усталости проводились на установке INSTRON. Как видно из рис. 3, кривая усталости в малоцикловой области для сплава 1421, обработанного по обычному режиму (закалка от 450 °С + старение 170 °С, 12 ч), располагается ниже кривой усталости сплава, подвергнутого высокотемпературной термомеханической обработке. Кроме того, обработка в режиме ВТМО уменьшает рассеяние результатов.

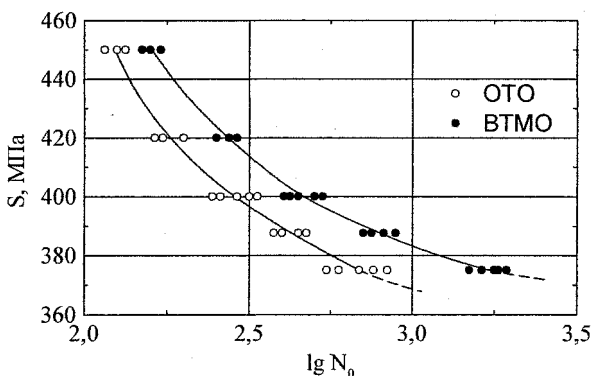


Рис. 3. Кривые усталости сплава 1421 в условиях малоцикловых испытаний

Из полученных результатов следует, что наиболее значительное повышение прочностных характеристик алюминий-магний-литиевых сплавов 1420 и 1421 обеспечивает ВТМО с деформацией в районе температур оптимального старения. Вместе с тем, низкотемпературная термомеханическая обработка снижает пластичность и ударную вязкость

алюминиевых сплавов 1420 и 1421. Это влияние ВТМО менее выражено при деформации в температурном интервале дисперсионного твердения, чем при холодном наклепе.

ВТМО обеспечивает незначительное повышение прочностных свойств сплавов 1420 и 1421 ( $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  возрастают на 2,5...4,5 %). Но эта обработка заметно увеличивает их пластичность (на 6...2 %), повышает ударную вязкость (на 13...28 %) и уменьшает склонность к интеркристаллитному охрупчиванию. Одновременно ВТМО повышает сопротивление сплавов 1420 и 1421 усталости, в том числе и малоцикловой.

### Литература

1. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И.Н. Фридляндер. - М.: Металлургия, 1979. - 208 с.
2. Фридляндер, И.Н. Конструкционные алюминий-магний-литиевые сплавы / И.Н. Фридляндер // *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 1990. - № 4. - С. 2-8.
3. Рабинович, М.Х. Термомеханическая обработка алюминиевых сплавов / М.Х. Рабинович. - М.: Машиностроение, 1972. - 160 с.
4. Исследование упрочнения алюминиевых сплавов после различных режимов термомеханической обработки / Н.Т. Карева, М.А. Смирнов, Ю.Д. Корягин, И.Я. Зальцман // *Технология легких сплавов.* - 1976. - № 5. - С. 18-25.
5. Корягин, Ю.Д. Структура и свойства сплавов системы Al-Mg-Li, упрочненных термической обработкой и деформацией / Ю.Д. Корягин, Б.К. Метелев, А.Ю. Данилович // *Технология легких сплавов.* - 1991. - №9-10. - С. 35-39.
6. О легировании алюминиевых сплавов добавками скандия и циркония / ВТ. Давыдов, В.И. Елагин, В.В. Захаров, Т.Д. Ростова // *Цветные металлы и сплавы.* - 1996. - №8. - С. 25-30.

Поступила в редакцию 2 сентября 2010 г.