

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОГО СПЛАВА АК7, ПОДВЕРГНУТОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМУ УПРОЧНЕНИЮ

Ю.Д. Корягин, Н.А. Шабурова, Г.П. Вяткин, В.И. Крайнов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Термомеханическая обработка существенно повышает многие механические характеристики и затрудняет интеркристаллитное разрушение деформируемых алюминиевых сплавов. Вместе с тем имеющиеся в литературе данные о применении такой обработки для улучшения комплекса свойств литейных алюминиевых сплавов практически отсутствуют. Интерес к процессам упрочнения литейных алюминиевых сплавов обусловлен стремлением к увеличению прочностных характеристик литых изделий, уменьшению их массы и стоимости, повышению надежности и долговечности всей конструкции. При этом повышение эксплуатационной надежности литых изделий должно быть основано в том числе на совершенствовании технологических методов их получения и обработки.

В настоящей работе представлены результаты исследования термомеханических параметров литейного сплава АК7 на пластометре, а также данные по влиянию различных режимов термической и термомеханической обработки на структуру, свойства и стабильность упрочненного состояния данного сплава. Проведенные исследования показывают, что комплекс свойств литейного сплава АК7 может быть улучшен применением термомеханической обработки. При этом низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) существенно повышает прочностные свойства сплава АК7 при заметном снижении пластичности. Теплая деформация предпочтительнее, чем холодная, так как обеспечивает лучший комплекс механических свойств. Отметим также, что при использовании НТМО заметно сокращается продолжительность старения сплава. В отличие от НТМО, высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) приводит к заметно меньшему упрочнению сплава, однако обеспечивает повышение пластичности и, как следствие, уменьшение склонности сплава к хрупкому разрушению.

Ключевые слова: сплав АК7, термомеханическая обработка, алюминиевые сплавы, упрочняющая обработка.

Для упрочнения стареющих алюминиевых деформируемых сплавов может быть использована термическая и термомеханическая обработки [1–7], в результате которых может быть достигнуто как увеличение прочностных характеристик, так и повышение пластичности и ударной вязкости этих сплавов [8–10]. Вместе с тем в промышленности находят широкое применение литейные алюминиевые сплавы. В связи с особенностями структуры изделия из литейных сплавов характеризуются пониженным уровнем прочностных характеристик, пластичности, повышенной склонностью к хрупкому разрушению и при этом обычная термическая обработка недостаточно эффективна для устранения этих недостатков [11–13].

В этой связи представлялось важным выяснить возможность улучшения свойств литейного сплава АК7 применением различных режимов термомеханической обработки.

Материалом исследования служил литейный алюминиевый сплав АК7, состав которого приведен в табл. 1.

Исследованный сплав выплавлялся в промышленной индукционной печи емкостью 400 кг и был поставлен в виде пластин размерами 40 × 15 × 400 мм. Пластины разрезались на заготовки размерами 15 × 15 × 120 мм для проведения термической и термомеханической обработок. Нагрев образцов под закалку осуществляли по режиму: нагрев при температуре (535 ± 5) °С с выдержкой 5 ч и после-

Таблица 1

Химический состав литейного алюминиевого сплава АК7 (масс. %)

Сплав	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Fe
АК7	Ост.	7,22	0,04	0,10	0,49	0,06	0,10	0,43

дующим немедленным охлаждением в воде комнатной температуры.

Предварительно с целью оценки возможности деформирования сплава были проведены эксперименты на пластометре [14, 15]. Для этого из литых и закаленных пластин изготавливали цилиндрические образцы размером $h_0 \times d_0 = 12 \times 8$ мм.

Исследования были проведены для следующих условий деформации:

– относительная степень деформации $\varepsilon = 10, 25, 50$ %, которая пересчитывалась в логарифмическую степень деформации

$$\varepsilon = \ln h_0/h_1,$$

где h_0 – высота образца до деформации; h_1 – высота образца после деформации;

– температура испытаний

$$t = 10, 100, 535 \text{ }^\circ\text{C};$$

– средняя скорость деформации

$$U_c = 1-2 \text{ с}^{-1}.$$

Уровень исследованных термомеханических параметров на пластометре был выбран с учетом применения последующих режимов термомеханической обработки с целью улучшения свойств литейного сплава АК 7:

закалка ($535 \text{ }^\circ\text{C} - 5 \text{ ч} \rightarrow$ вода) + старение по режимам: $150 \text{ }^\circ\text{C} - 3 \text{ ч}$; $150 \text{ }^\circ\text{C} - 5 \text{ ч}$; $170 \text{ }^\circ\text{C} - 4 \text{ ч}$; $200 \text{ }^\circ\text{C} - 4 \text{ ч}$;

деформация предварительно закаленного сплава при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью 30 % + старение $170 \text{ }^\circ\text{C} - 2 \text{ ч}$;

деформация при $150 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью 15 % + старение: $150 \text{ }^\circ\text{C} - 4 \text{ ч}$; $170 \text{ }^\circ\text{C} - 2 \text{ ч}$;

деформация при $150 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью 30 % + старение: $170 \text{ }^\circ\text{C} - 2 \text{ ч}$;

деформация при $200 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью 15 % + старение: $150 \text{ }^\circ\text{C} - 4 \text{ ч}$;

деформация при $535 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью 15 % + старение: $150 \text{ }^\circ\text{C} - 5 \text{ ч}$;

деформация при $535 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью 30 % + старение $150 \text{ }^\circ\text{C} - 5 \text{ ч}$;

деформация при $535 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью 30 % + старение $170 \text{ }^\circ\text{C} - 3 \text{ ч}$.

При исследовании на кулачковом пластометре (ЮУрГУ), который позволяет моделировать законы изменения степени и скорости деформации вдоль очага деформации при продольной прокатке, были получены кривые упрочнения сплава АК7 в литом и закаленном состоянии (рис. 1, 2).

Оценка пластичности сплава осуществлялась обжатием цилиндрических образцов ($h_0 \times d_0 = 16 \times 10$ мм) на пластометре до появления первой макротрещины на боковой поверхности образцов. Показателем пластичности служит критическая степень деформации:

$$\varepsilon_p = \ln h_0/h_p, \quad (1)$$

где h_0, h_p – начальная высота образца и высота образца в момент появления первой макротрещины на его образующей соответственно.

Кривые упрочнения имеют ярко выраженный максимум только для литого состояния сплава: $\varepsilon_{li} = 0,075$ при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1, кривая 2) и $\varepsilon_{li} = 0,1$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1, кривая 1). Для закаленного состояния (см. рис. 1, кривые 4 и 5) кривые упрочнения имеют воз-

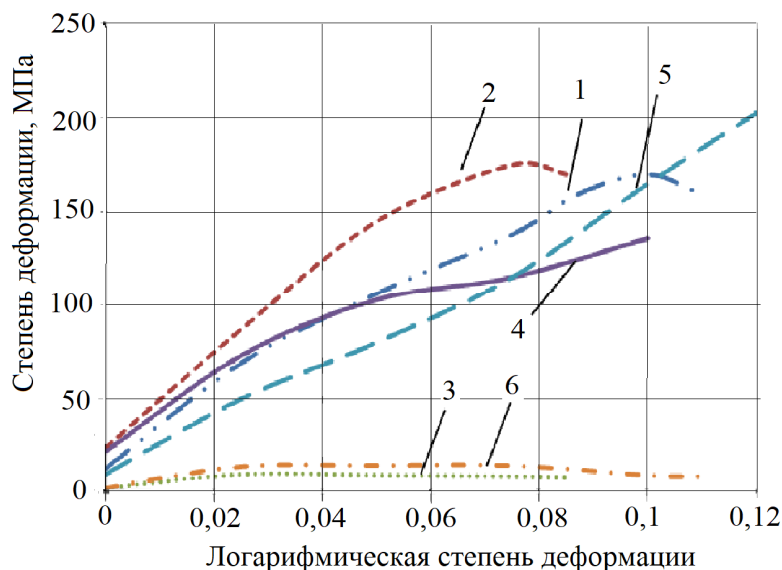


Рис. 1. Кривые упрочнения сплава АК7 при $\varepsilon = 10$ %: кривые 1, 2, 3 – литое состояние; кривые 4, 5, 6 – закаленное состояние; кривые 1, 4 – $20 \text{ }^\circ\text{C}$; кривые 2, 5 – $100 \text{ }^\circ\text{C}$; кривые 3, 6 – $535 \text{ }^\circ\text{C}$

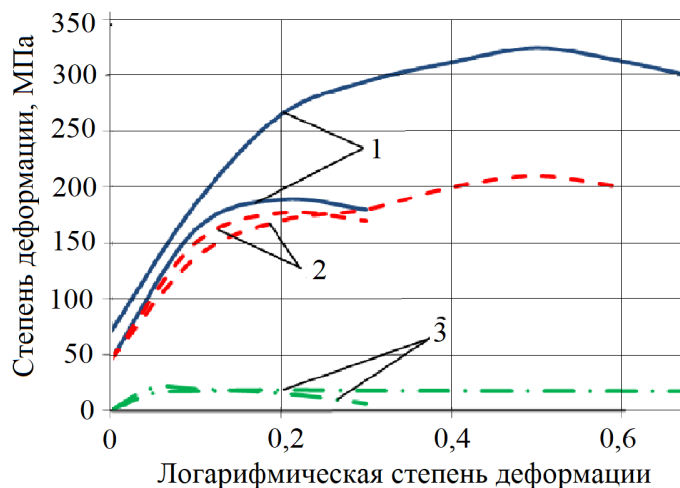


Рис. 2. Кривые упрочнения сплава АК7 в закаленном состоянии: кривая 1 – 20 °С; кривая 2 – 100 °С; кривая 3 – 535 °С

растающий характер для всех исследованных температур. При этом сопротивление деформации при 100 °С в литом исходном состоянии сплава выше, чем в закаленном состоянии (см. рис. 1, кривые 2 и 5). Влияние температуры деформации неоднозначно для различного состояния сплава. Если для закаленного состояния при 20 °С сопротивление деформации (см. рис. 2, кривая 1) больше, чем при 100 °С, то для литого состояния в начале кривой до $\epsilon_{li} = 0,2$ прослеживается обратная закономерность (рис. 3).

Характер кривых упрочнения (см. рис. 1–3) при температуре деформации 535 °С практически одинаков для всех степеней деформации и практически не зависит от исходного состояния сплава.

Сравнение сопротивления деформации литого и закаленного состояния сплавов пока-

зывает, что закалка приводит к росту сопротивления деформации только при температуре испытаний 20 °С и $\epsilon_{li} = 0,6$ (см. рис. 3, кривая 1), а при $\epsilon_{li} = 0,1$ и температуре 100 °С наоборот – закаленный сплав имеет меньшее сопротивление деформации. В остальных случаях исходное состояние сплава не оказывает существенного влияния на величину сопротивления деформации.

По результатам исследования пластичности сплава АК7 установлено, что сплав можно деформировать со степенями до 30–35 % без нарушения сплошности во всем исследованном интервале температур как в литом, так и закаленном состояниях. Это позволяет использовать термомеханическую обработку для упрочнения сплава.

Пластическая деформация при термомеханической обработке осуществлялась про-

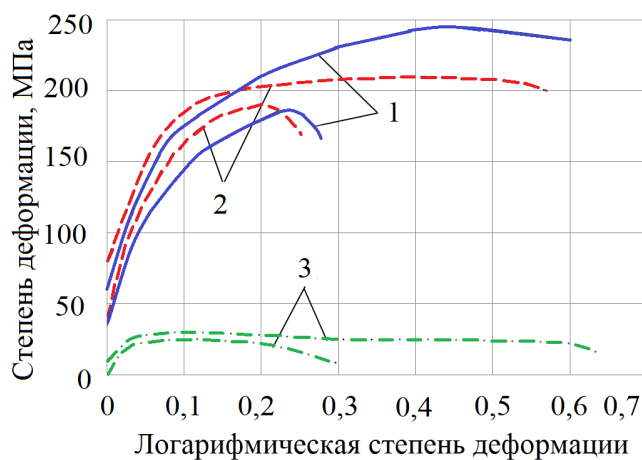


Рис. 3. Кривые упрочнения сплава АК7 в литом состоянии: кривая 1 – 20 °С; кривая 2 – 100 °С; кривая 3 – 535 °С

каткой заготовок (размером $14 \times 14 \times 150$ мм) на двухвалковом прокатном стане со скоростью деформации 1 с^{-1} при температурах от комнатной до температуры гомогенизации сплава со степенями деформации 15 и 30 %.

Закаленные заготовки под прокатку нагревали до температуры деформирования в масляной или селитровой ванне в течение времени, достаточного для полного прогрева заготовок по их сечению. Прокатка при $535 \text{ }^\circ\text{C}$ осуществлялась сразу после гомогенизации. Холодная деформация осуществлялась на закаленных заготовках. Из прокатанных заготовок изготавливали стандартные образцы для определения механических характеристик.

Установлено, что упрочнение сплава сложным образом зависит от температуры и степени пластической деформации (рис. 4). Как и следовало ожидать, холодная прокатка способствует повышению твердости сплава.

Этот эффект тем больше, чем выше степень обжатия. Прирост прочности, обеспечиваемый прокаткой при $100\text{--}150 \text{ }^\circ\text{C}$ с малыми степенями деформации (15 %), заметно больше, чем в случае аналогичной холодной деформации. Увеличение степени деформации до 30 % при этих температурах в отличие от холодного наклепа незначительно увеличивает твердость.

Пластическая деформация в интервале $200\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C}$ хотя и приводит к уменьшению эффекта упрочнения, однако и в этом случае твердость деформированных образцов заметно выше, чем недеформированных. Отметим, что при указанных температурах деформация со степенью 15 % обеспечивает несколько большее упрочнение, чем с обжатием 30 %, что можно объяснить интенсификацией распада пересыщенного α -твердого раствора в этом температурном интервале с увеличением

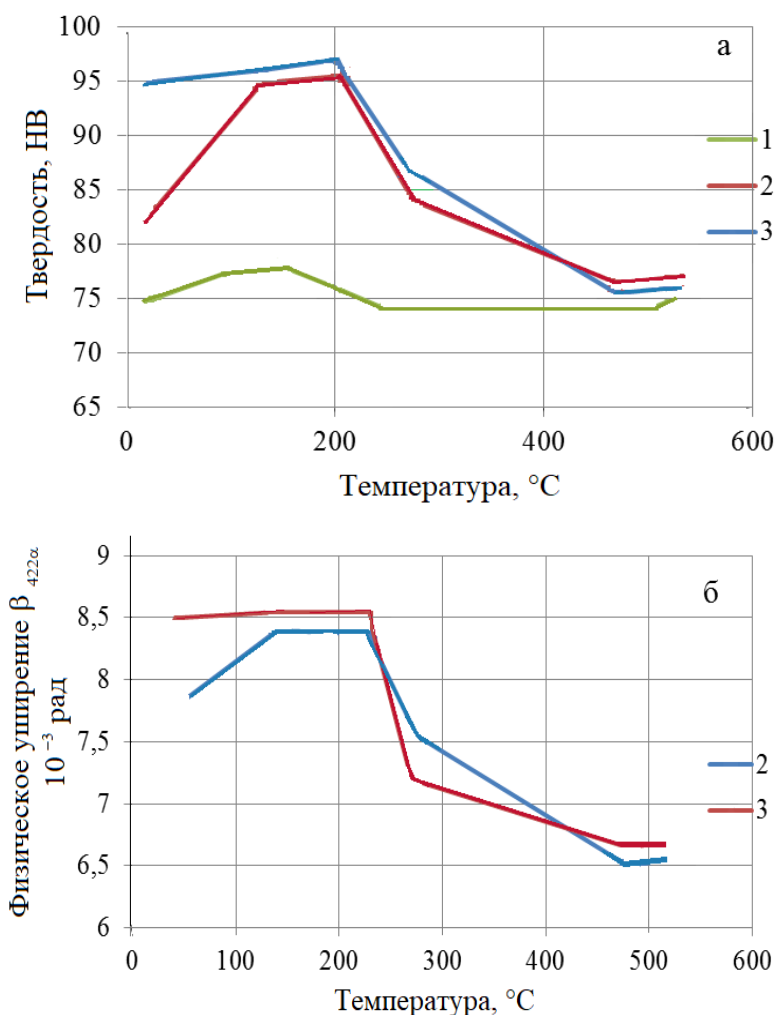


Рис. 4. Зависимость твердости (а) и физического уширения β линии $(422)_{\alpha 1}$ (б) сплава АК7 от температуры и степени деформации: 1 – $\varepsilon = 0\%$; 2 – $\varepsilon = 15\%$; 3 – $\varepsilon = 30\%$

степени деформации и переходом от зонной стадии к выделению метастабильной β' -фазы и стабильной β -фазы [5, 6].

Деформация при 500 и 535 °С приводит к заметно меньшему упрочнению сплава, чем при холодном и теплом наклепе (20–200 °С). При этом величина упрочнения слабо зависит от степени деформации.

Как показали рентгеноструктурные исследования, с увеличением степени холодной пластической деформации от 15 до 30 % наблюдается увеличение физического уширения линии $(422)_{\alpha 1}$ с $7,8 \cdot 10^{-3}$ до $8,6 \cdot 10^{-3}$ рад (см. рис. 3, б). Дополнительно были проведены исследования удельного электросопротивления. Был отмечен рост этого параметра с 0,0469 до 0,0475 мкОм·м с увеличением степени холодной пластической деформации от 15 до 30 %. Рост удельного электросопротивления обусловлен не только наклепом матрицы, но и развитием зонной стадии распада пересыщенного твердого раствора во время деформирования.

С повышением температуры прокатки до 100 °С процессы распада твердого раствора протекают более интенсивно. Об этом свидетельствуют как дальнейший рост удельного электросопротивления (до 0,0495 мкОм·м), так и уменьшение параметра решетки α -твердого раствора образцов сплава (с 4,0495 Å при холодной деформации до 4,0485 Å, деформированных при 100 °С с обжатием 30 %).

Значение величины физического уширения линии $(422)_{\alpha 1}$ образцов, подвергнутых деформации со степенями 15 % при 150 °С, выше, чем холоднодеформированных с этой же степенью. Это связано с увеличением плотности дефектов кристаллического строения вследствие интенсификации процессов распада при повышении температуры деформирования.

Деформация со степенью 30 % при температурах 200 и 250 °С приводит к снижению удельного электросопротивления, и оно становится меньше, чем для закаленного сплава (с 0,0464 до 0,0449 и 0,0431 мкОм·м для деформированных при 200 и 250 °С соответственно). Интервал температур от 250 до 450 °С является неприемлемым для осуществления термомеханической обработки вследствие незначительного упрочнения, а главное, в связи с малой устойчивостью пересыщенного α -твердого раствора, которая еще в большей степени уменьшается под воздействием пластической деформации [4, 12, 13].

Деформирование при температуре 500 °С практически не приводит к упрочнению сплава по сравнению с закаленным состоянием (твердость повышается на 1–2 НВ).

Деформация при температуре гомогенизации 535 °С со степенями 15 и 30 % обеспечивает незначительное повышение твердости сплава по сравнению с закалкой, и оно существенно меньше, чем при холодном и теплом наклепе. Деформированные при этой температуре образцы имеют несколько более высокие значения удельного электросопротивления, чем недеформированные. В данном случае упрочнение сплава определяется в основном степенью наклепа матрицы, который, судя по физическому уширению, невелик. Как показали микроструктурные и рентгеноструктурные исследования, выбранные условия деформации позволяют полностью подавить рекристаллизацию сплава, что и обеспечивает получение дополнительного упрочнения. Таким образом, сплав АК7 может быть упрочнен деформацией при температурах, когда распад твердого раствора в основном ограничивается зонной стадией, либо при температуре гомогенизации (535 °С), при которой распад твердого раствора исключен, а режим обработки обеспечивает подавление процессов рекристаллизации.

Механические свойства исследуемого литейного алюминиевого сплава АК7 после некоторых режимов обработки приведены в табл. 2. Установлено, что в состаренном состоянии наибольший и примерно одинаковый прирост прочностных характеристик по сравнению с недеформированным состоянием (обработкой по стандартному режиму, рекомендованному для сплава АК7 – Т5) обеспечивает деформация при 20 и 150 °С с обжатием 30 %. Пределы текучести и прочности сплава после исследованных режимов НТМО повышаются на 22 и 18 % соответственно. Такое упрочнение сопровождается снижением относительного удлинения (δ) при статическом нагружении. При этом важно подчеркнуть, что при использовании теплой деформации формируется более благоприятное соотношение между прочностными характеристиками и пластичностью, чем при холодном наклепе.

ВТМО хотя и значительно слабее, чем НТМО, повышает прочностные свойства, однако заметно увеличивает пластичность (δ), характеризующую в определенной степени

Таблица 2

Механические свойства алюминиевого сплава АЛ9
после различных видов обработок

Исходное состояние и режим обработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_2 , %	
Литое состояние	160	115	3,0	
Закалка (535 °С – 5 ч → вода) + старение: 150 °С – 3 ч	185	130	4,9	
	200	160	3,8	
	150 °С – 5 ч	235	165	3,4
	170 °С – 4 ч	245	180	3,2
	200 °С – 4 ч	225	165	4,0
Деформация при 20 °С со степенью 30 % + старение 170 °С – 2 ч	280	215	2,2	
Деформация при 150 °С со степенью 15 % + старение: 150 °С – 4 ч	270	210	2,6	
	170 °С – 2 ч	265	205	2,7
	деформация со степенью 30 % + старение: 170 °С – 2 ч	285	215	2,5
Деформация при 200 °С со степенью 15 % + старение: 150 °С – 4 ч	250	190	3,0	
Деформация при 535 °С со степенью 15 % + старение: 150 °С – 5 ч	250	195	5,7	
	деформация со степенью 30 % + старение 150 °С – 5 ч	265	205	5,2
	170 °С – 3 ч	270	210	4,9

склонность сплава к хрупкому разрушению [5]. Фрактографические исследования показывают, что в изломах образцов сплава, подвергнутого ВТМО, заметно уменьшается доля интеркристаллитной составляющей. Следует отметить, что горячая пластическая деформация уменьшает также и пористость отливки.

Выводы

Таким образом, комплекс свойств литейного сплава АК7 может быть улучшен применением термомеханической обработки. При этом низкотемпературная термомеханическая

обработка (НТМО) существенно повышает прочностные свойства сплава АК7 при заметном снижении пластичности. Теплая деформация предпочтительнее, чем холодная, так как обеспечивает лучший комплекс механических свойств. Отметим также, что при использовании НТМО заметно сокращается продолжительность старения сплава. В отличие от НТМО, высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) приводит к заметно меньшему упрочнению сплава, однако обеспечивает повышение пластичности и, как следствие, уменьшение склонности сплава к хрупкому разрушению.

Литература

1. Исследование упрочнения алюминиевых сплавов после различных режимов термомеханической обработки / М.А. Смирнов, Н.Т. Карева, Ю.Д. Корягин и др. // *Технология легких сплавов*. – 1976. – № 5. – С. 19–25.
2. Карева, Н.Т. Термомеханическая обработка стареющих алюминиевых сплавов / Н.Т. Карева, Ю.Д. Корягин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2014. – № 9 (711). – С. 28–33.
3. Колобнев, И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов / И.Ф. Колобнев. – М.: *Металлургия*, 1966. – 394 с.
4. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо – М.: *Металлургия*, 1979. – 640 с.

Металловедение и термическая обработка

5. *Металловедение алюминия и его сплавов: справ. изд. / А.И. Беляев, О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 280 с.*
6. *Промышленные алюминиевые сплавы / под ред. Ф.И. Квасова и И.Н. Фриндландера. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.*
7. *Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1979. – 432 с.*
8. *Богданова, Т.А. Влияние режимов термической обработки и нанесения декоративно-защитного покрытия на механические свойства и структуру дисков автомобильных колес из сплава АК7пч / Т.А. Богданова, Н.Н. Довженко, Г.А. Меркулова // Вестник МГТУ им. Носова. – 2014. – № 3. – С. 40–43.*
9. *Антонов, М.М. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства сплава АК7пч / М.М. Антонов // XII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С. 64–66.*
10. *Фомичёва, Е.М. Исследование технологического процесса термической обработки деталей из сплава АК7ч для сокращения времени изготовления готовой продукции // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2015. – Т. 23, № 2. – С. 139–145. DOI: 10.14498/tech.2015.2.%u*
11. *Аристова, Н.А. Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов / Н.А. Аристова, И.Ф. Колобнев. – М.: Металлургия, 1977. – 143 с.*
12. *Корягин, Ю.Д. Структура и свойства литейного сплава АЛ9, подвергнутого термомеханическому упрочнению / Ю.Д. Корягин, Н.А. Шабурова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия» – 2007. – № 13. – С. 32–35.*
13. *Шабурова, Н.А. Влияние температуры и степени пластической деформации на структуру и свойства литейного алюминиевого сплава АЛ9 / Н.А. Шабурова, Ю.Д. Корягин / Наука и технологии. Тезисы докладов XXVII Российской школы, посвященной 150-летию К.Э. Циолковского, 100-летию С.П. Королева и 60-летию Государственного ракетного центра «КБ им. Академика С.П. Макеева». – Миасс: МСНТ, 2007. – С. 105.*
14. *Пластометрические исследования на автоматизированном цифровом пластометре: учеб. пособие для самостоят. работы / сост.: В.И. Крайнов, В.С. Кропачев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 25 с.*
15. *Пластометр для исследования деформируемости металлов: методические указания к выполнению лабораторных работ / сост. В.Г. Дукмасов, В.И. Крайнов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 36 с.*

Корягин Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kogiaginyd@susu.ru.

Шабурова Наталия Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shaburovana@susu.ru.

Вяткин Герман Платонович, д-р хим. наук, советник при ректорате, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; viatkingp@susu.ru.

Крайнов Василий Иванович, канд. техн. наук, профессор кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; krainovvi@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 13 мая 2020 г.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF CAST ALLOY AK7 AFTER THERMOMECHANICAL HARDENING

Yu.D. Koryagin, koriaginyd@susu.ru,
N.A. Shaburova, shaburovana@susu.ru,
G.P. Vyatkin, viatkingp@susu.ru,
V.I. Krainov, krainovvi@susu.ac.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Thermomechanical treatment significantly increases many mechanical characteristics and complicates intercrystalline destruction of wrought aluminum alloys. At the same time, there are practically no data available in the literature on the use of such a treatment to improve the complex of properties of cast aluminum alloys. The interest in the processes of hardening of cast aluminum alloys is due to the desire to increase the strength characteristics of cast products, reduce their weight and cost, and increase the reliability and durability of the entire structure. At the same time, an increase in the operational reliability of cast products should be based, inter alia, on the improvement of technological methods for their production and processing.

This paper presents the results of studying the thermomechanical parameters of the AK7 casting alloy on a plastometer, as well as data on the effect of different modes of thermal and thermomechanical treatment on the structure, properties and stability of the hardened state of this alloy. The studies carried out show that the complex of properties of the AK7 casting alloy can be improved by using thermomechanical treatment. At the same time, low-temperature thermomechanical treatment (LTMT) significantly increases the strength properties of the AK7 alloy with a noticeable decrease in plasticity. Warm deformation is preferable to cold deformation as it provides the best set of mechanical properties. Note also that the use of LHMT significantly reduces the aging time of the alloy. In contrast to HTMT, high-temperature thermomechanical treatment (HTMT) leads to noticeably less hardening of the alloy, but it provides an increase in plasticity and, as a consequence, a decrease in the tendency of the alloy to brittle fracture.

Keywords: AK7 alloy, thermomechanical treatment, aluminum alloys, hardening treatment.

References

1. Smirnov M.A., Kareva N.T., Koryagin Yu.D. et al. [Investigation of hardening of aluminum alloys after different modes of thermomechanical processing]. *Technology of light alloys*, 1976, no. 5, pp. 19–25. (in Russ.)
2. Kareva N.T., Koryagin Yu.D. [Thermomechanical treatment of aging aluminum alloys]. *Metallurgy and heat treatment of metals*, 2014, no. 9 (711), pp. 28–33. (in Russ.)
3. Kolobnev I.F. *Termicheskaya obrabotka alyuminiyevykh splavov* [Heat treatment of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1966. 394 p.
4. Mondolfo L.F. *Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov* [Structure and properties of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979. 640 p.
5. Belyaev A.I., Bocharov O.S., Buinov N.N. et al. *Metallovedeniye alyuminiya i ego splavov: sprav. izd.* [Metallurgy of aluminum and its alloys: Ref. ed.]. 2nd ed. Moscow, Metallurgy Publ., 1983. 280 p.
6. Kvasov F.I., Frindlander I.N. (Eds.). *Promyshlennyye alyuminiyevyye splavy* [Industrial aluminum alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1984. 528 p.
7. *Alyuminiyevyye splavy. Struktura i svoystva polufabrikatov iz alyuminiyevykh splavov. Spravochnik* [Aluminum alloys. Structure and properties of semi-finished products from aluminum alloys. Directory]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979. 432 p.
8. Bogdanova T.A., Dovzhenko N.N., Bogdanova T.A., Merkulova G.A. [The influence of the modes of heat treatment and application of decorative and protective coatings on the mechanical properties and structure of disks of automobile wheels made of АК7пч alloy]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2014. no. 3, pp. 40–43. (in Russ.)

9. Antonov M.M. [Study of the influence of heat treatment modes on the structure and properties of the АК7пч alloy]. *XII International scientific and technical Ural school-seminar of metal scientists – young scientists*. Ekaterinburg, UrFU Publ, 2011, pp. 64–66. (in Russ.)
10. Fomicheva E.M. [Research of technological process of heat treatment of details of the alloy АК7ч for reduction of time of production of finished goods]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2015, vol. 23, no. 2, pp. 139–145. (in Russ.) DOI: 10.14498/tech.2015.2.%u
11. Aristova N.A., Kolobnev I.F. *Termicheskaya obrabotka liteynykh alyuminiyevykh splavov* [Heat treatment of casting aluminum alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1977. 143 p.
12. Koryagin Yu.D., Shaburova N.A. [Structure and properties of the AL9 casting alloy subjected to thermomechanical hardening]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2007, no. 13, pp. 32–35. (in Russ.)
13. Shaburova N.A., Koryagin Yu.D. [Influence of temperature and degree of plastic deformation on the structure and properties of the AL9 casting aluminum alloy]. *Science and Technology. Abstracts of the XXVII Russian School dedicated to the 150th anniversary of K.E. Tsiolkovsky, to the 100th anniversary of S.P. Korolev and the 60th anniversary of the State Missile Center “KB im. Academician S.P. Makeev”*. Miass, MSCT Publ., 2007, p. 105.
14. Krainov V.I., Kropachev V.S. *Plastometricheskiye issledovaniya na avtomatizirovannom tsifrovom plastometre: ucheb. posobiye dlya samostoyat. raboty* [Plastometric studies on an automated digital plastometer: a tutorial for independent work]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2004. 25 p.
15. Krainov V.I., Dukmasov V.G. *Plastometr dlya issledovaniya deformiruyemosti metallov: metodicheskiye ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot* [Plastometer for studying the deformability of metals: guidelines for laboratory work]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2011. 36 p.

Received 13 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Структура и свойства литейного сплава АК7, подвергнутого термомеханическому упрочнению / Ю.Д. Корягин, Н.А. Шабурова, Г.П. Вяткин, В.И. Крайнов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 72–80. DOI: 10.14529/met200308

FOR CITATION

Koryagin Yu.D., Shaburova N.A., Vyatkin G.P., Krainov V.I. Structure and Properties of Cast Alloy АК7 after Thermomechanical Hardening. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 72–80. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200308
