

Металловедение и термическая обработка Physical metallurgy and heat treatment

Научная статья
УДК 669.017
DOI: 10.14529/met230303

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Ю.Д. Корягин, *koriaginyd@susu.ru*
М.А. Стенников, *stennkovma@susu.ru*
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Работа посвящена повышению комплекса свойств литейного алюминиевого сплава путем деформационного упрочнения. В работе приведены результаты экспериментов по возможности использования пластической деформации высокопрочного литейного алюминиевого сплава с целью повышения комплекса механических характеристик. С этой целью изготовлены специальные образцы и оценена склонность сплава к пластической деформации на пластометре. Показано, что данный сплав возможно подвергать пластической деформации при комнатной и повышенной температурах до 30 % без появления трещин. Дополнительно оценивалась пластичность сплавов при температуре деформирования 20–545 °С по появлению первых трещин на образующих образцов. Установлено, что прочностные характеристики зависят от температуры и величины пластической деформации. Пластическая деформация образцов осуществлялась прокаткой при температурах 20, 170 и 545 °С со степенями 15 и 30 % со скоростью 1 с⁻¹ с последующим старением при температуре 170 °С. Наибольший эффект упрочнения достигается при НТМО с деформацией 30 % в районе температур оптимального старения. ВТМО обеспечивает некоторое повышение прочностных характеристик сплава по сравнению с закаленным состоянием при одновременном увеличении пластичности. Установлено, что пластическая деформация оказывает интенсифицирующее влияние на процессы старения литейного алюминиевого сплава. Особенно интенсивно ускоряет распад твердого раствора при старении предварительная деформация, проводимая при дисперсионном твердении сплава.

Ключевые слова: пластическая деформация, литейные алюминиевые сплавы, упрочнение, термомеханическая термообработка

Для цитирования: Корягин Ю.Д., Стенников М.А. Термомеханическая обработка высокопрочных литейных алюминиевых сплавов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т. 23, № 3. С. 30–37. DOI: 10.14529/met230303

Original article
DOI: 10.14529/met230303

THERMOMECHANICAL PROCESSING OF HIGH-STRENGTH CAST ALUMINUM ALLOYS

Yu.D. Koryagin, *koriaginyd@susu.ru*
M.A. Stennikov, *stennkovma@susu.ru*
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The aim of the work is to improving the complex properties of cast aluminum alloy by strain hardening. The paper presents the results of experiments on the possibility and use of plastic deformation of the casting alloy VAL14 in order to improve the complex of mechanical characteristics. For this purpose, special samples were made and the tendency of the alloy to plastic deformation was evaluated on a plastometer. It is shown that this alloy can be subjected to plastic deformation at room and elevated temperatures up to 30 % without the appearance of cracks. Additionally, the ductility of the alloys was evaluated

at a deformation temperature of 20–545 °C by the appearance of the first cracks on the generatrices of the samples. It was established that the strength characteristics depend on temperature and the magnitude of plastic deformation. Plastic deformation of the samples was carried out by rolling at temperatures of 20, 170 and 545 °C with degrees of 15 and 30 % at a rate of 1 s⁻¹, followed by aging at a temperature of 170 °C. The greatest strengthening effect is achieved with LTMT with a deformation of 30 % in the region of optimal aging temperatures. HTMT provides some increase in the strength characteristics of the alloy compared to the quenched state, with a simultaneous increase in ductility. It was established that plastic deformation has an intensifying effect on the aging processes of a cast aluminum alloy. Particularly intensively accelerates the decomposition of the solid solution during aging, the preliminary deformation carried out during precipitation hardening of the alloy.

Keywords: plastic deformation, cast aluminum alloys, hardening, thermomechanical heat treatment

For citation: Koryagin Yu.D., Stennikov M.A. Thermomechanical processing of high-strength cast aluminum alloys. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2023;23(3):30–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230303

Введение

В работе [1] было показано, что для упрочнения стареющих алюминиевых деформируемых сплавов может быть использована как низко-, так и высокотемпературная термомеханическая обработка, в результате которой может быть достигнуто не только увеличение их прочностных характеристик, но и повышение пластичности и ударной вязкости.

Вместе с тем в промышленности находят широкое применение литейные алюминиевые сплавы. В связи с особенностями структуры литые детали часто характеризуются пониженным уровнем прочностных характеристик, пластичности и повышенной склонностью к хрупкому разрушению, причем обычная термическая обработка не всегда эффективна для устранения этих недостатков.

Учитывая, что служебные свойства сплавов в значительной мере определяются их структурным состоянием, представлялось важным выяснить возможность улучшения свойств литейных сплавов методом термомеханической обработки.

Изучалась возможность деформирования литейных сплавов с оценкой их сопротивления деформации при температурах проведения термомеханической обработки. Исследовалось влияние ТМО на структуру и свойства литейных сплавов, при этом пластическая деформация осуществлялась в широком интервале температур [2]. Анализировали также особенности разрушения литейных алюминиевых сплавов, подвергнутых пластической деформации.

Материал и методика исследования

Материалом исследования служил литейный алюминиево-магниевый сплав, характе-

ризующийся высокой прочностью при комнатной температуре и повышенной жаропрочностью, нашедший широкое применение в машиностроении.

Химический состав исследуемого сплава в отличие от других литейных алюминиевых сплавов характеризуется несколько меньшим содержанием меди и марганца и большей чистотой по примесям кремния, цинка и железа, а также наличием добавок, которые согласно [3–5] повышает прочностные характеристики сплавов после старения. Авторы [4] связывают повышение прочностных свойств микролегированного кадмием сплава при старении с возникновением в сплавах системы кластеров «медь – кадмий – вакансия», в которых вакансии, обеспечивающие диффузию в течение длительного времени, оказываются связанными. Кроме того, появление таких кластеров приводит к уменьшению поверхностной энергии на границе раздела «θ'-фаза – матрица». В результате количество зон Гинье – Престона и скорость их образования уменьшаются, а выделение θ'-фазы ускоряется; частицы этой фазы становятся мельче, и плотность их распределения возрастает. Положительное влияние кадмия на формирование мелкозернистой структуры и повышение прочности сплава отмечается и в работе [6].

Исследованный сплав выплавлялся в промышленной индукционной печи емкостью 400 кг и был поставлен в виде пластин размерами 40 × 150 × 400 мм. Пластины разрезались на заготовки размерами 40 × 40 × 120 мм и 15 × 15 × 120 мм для проведения термической и термомеханической обработок.

Нагрев образцов сплава под закалку осуществляли по двухступенчатому режиму [7, 8]: нагрев при температуре 535 °C с выдержкой 7 ч,

подъем температуры до 545 °С, выдержки при этой температуре 7 ч и охлаждение в воде.

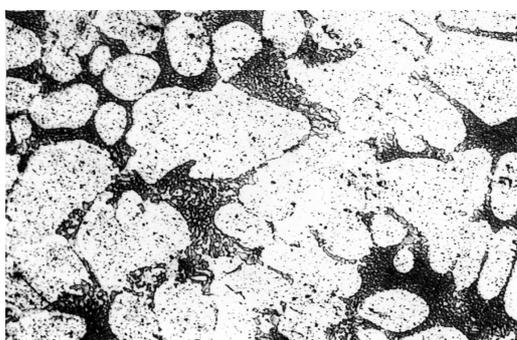
Для выяснения возможности осуществления пластической деформации в интервале температур проведения термомеханических обработок литейного сплава были проведены эксперименты по оценке склонности сплавов к пластическому деформированию. Определение сопротивления деформации исследуемых сплавов проводилось на пластометре ЧПИ-2 [9, 10] на цилиндрических образцах с размерами $h_0 \times d_0 = 12 \times 18$ мм и испытательной машине 1231У-10 (образцы диаметром 20 мм и высотой 30 мм) при скорости деформации $1,0 \dots 1,7 \text{ с}^{-1}$. Дополнительно оценивалась пластичность сплавов при температурах деформирования (20...545 °С) по появлению первых макротрещин на образующей образца.

Пластическая деформация при термомеханической обработке осуществлялась прокаткой со скоростью 1 с^{-1} в интервале 20...545 °С со степенями 15 и 30 %. Деформации при 20...300 °С подвергали предварительно закаленные заготовки. Нагрев до температуры прокатки осуществлялся в селитро-

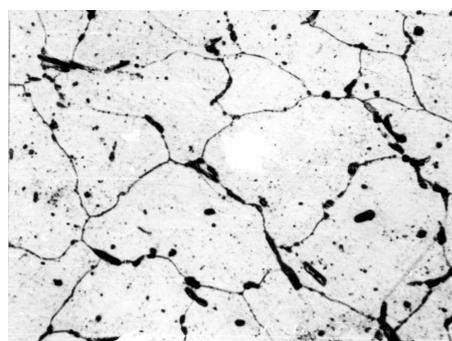
вой ванне с 5-минутной выдержкой. Деформация при ВТМО осуществлялась на заготовках сразу после окончания выдержки при нагреве под закалку. Деформация заготовок проводилась за один проход с немедленным охлаждением в воде с целью фиксации полученного структурного состояния. Недеформированные и деформированные заготовки подвергали старению при температурах до 200 °С в масляных термостатах ТС-24А, а при более высокой температуре – в селитровой ванне не позднее чем через 30 мин после закалки.

Результаты и их обсуждение

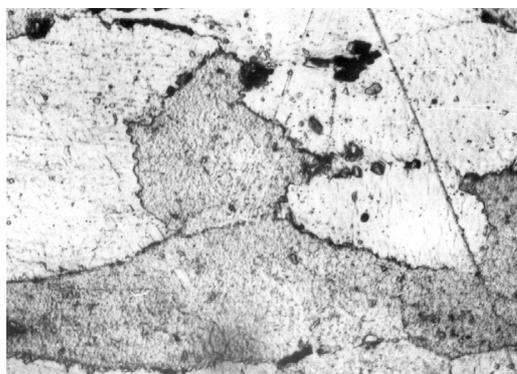
Как показали микроструктурные исследования (рис. 1а), отлитые заготовки имели структуру, типичную для литейных сплавов: α -твердый раствор + CuAl_2 + $T_{\text{Mn}}(\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu})$ + Al_3Ti . В литом состоянии фаза $T_{\text{Mn}}(\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu})$ выявляется в основном по границам зерен, имеет довольно разветвленную форму и при травлении 0,5 % раствором плавиковой кислоты окрашивается в черный цвет. Фаза CuAl_2 , хорошо очерченная, неокрашенная, располагается по границам зерен в виде раз-



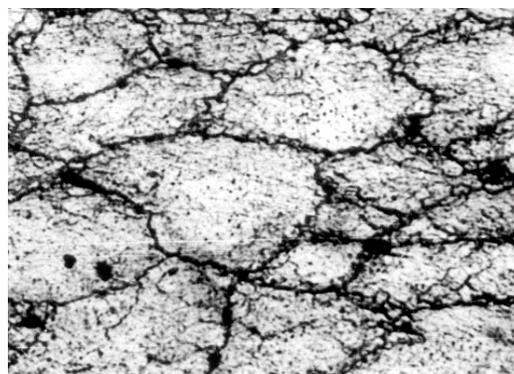
a)



b)



c)



d)

Рис. 1. Микроструктура сплава: а – исходное литое состояние (шлиф не травлен), $\times 400$; б – закаленное состояние, $\times 500$; с – НТМО, $\times 600$; д – ВТМО, $\times 500$

Fig. 1. Alloy microstructure: a – initial cast state (section not etched), $\times 400$;

b – hardened state, $\times 500$; c – heat treatment, $\times 600$; d – out-of-furnace heat treatment, $\times 500$

ветвленных образований. Фаза Al_3Ti (серого цвета) кристаллизуется в форме пластин и крестиков.

При нагреве под закалку фаза $CuAl_2$ полностью растворяется и переводится в твердый раствор. Фазовый состав сплавов в закаленном состоянии: α -твердый раствор, легированный медью и марганцем за счет растворения фазы $CuAl_2$ и частичного растворения марганца в процессе кристаллизации, фаза $T_{Mn}(Al_{12}Mn_2Cu)$ и фаза Al_3Ti . В термообработанном состоянии фаза T_{Mn} располагается как по границам зерен в виде разветвленных образований, так и внутри зерен твердого раствора в виде мелкодисперсных точечных выделений.

На рис. 2 приведены кривые изменения сопротивления деформации (σ_s) сплава при различных температурах в зависимости от их исходного состояния (литые и закаленные образцы). Установлено, что характер упрочнения сплава при всех исследованных температурах деформирования идентичен: кривая сопротивления деформации закаленного сплава всегда располагается выше аналогичной кривой сплава с исходной литой структурой. При холодной деформации наиболее интенсивное упрочнение сплава наблюдается до степеней деформации 20...25 %, а затем процесс деформационного упрочнения замедляется. При этом сопротивление деформации сплава составляет 310 МПа.

Повышение температуры деформации до 150 и тем более до 200 °С приводит к заметному снижению сопротивления деформации

сплава. Следует отметить, что наиболее интенсивное упрочнение сплава при этой температуре происходит при относительно небольших степенях деформации (15...20 %), затем процесс деформационного упрочнения замедляется, а при деформациях более 30...35 % начинает проявляться влияние динамического разупрочнения.

Наиболее значительное снижение значений сопротивления деформации сплавов (до 15...37 МПа) происходит при повышении температуры деформирования до 545 °С в результате конкуренции процессов упрочнения и разупрочнения и возрастающего вклада последних. При этой температуре характер изменения кривых сопротивления деформации сплава в литом и закаленном состояниях типичен для кривых горячедеформированных материалов: после незначительного подъема, обусловленного деформационным упрочнением, наблюдается пологий спад кривых зависимости напряжения от деформации.

Важно отметить, что образцы литейного сплава при проведении вышеописанного эксперимента не разрушались при всех исследованных степенях деформации вплоть до 40...45 %.

Дополнительно была оценена пластичность исследуемого сплава с определением критической степени деформации, вызывающей появление первой трещины на образующей образца. Проведенные испытания на осадку цилиндрических образцов (диаметром 20 и высотой 30 мм) позволили сделать вывод о том, что наименее благоприятным является

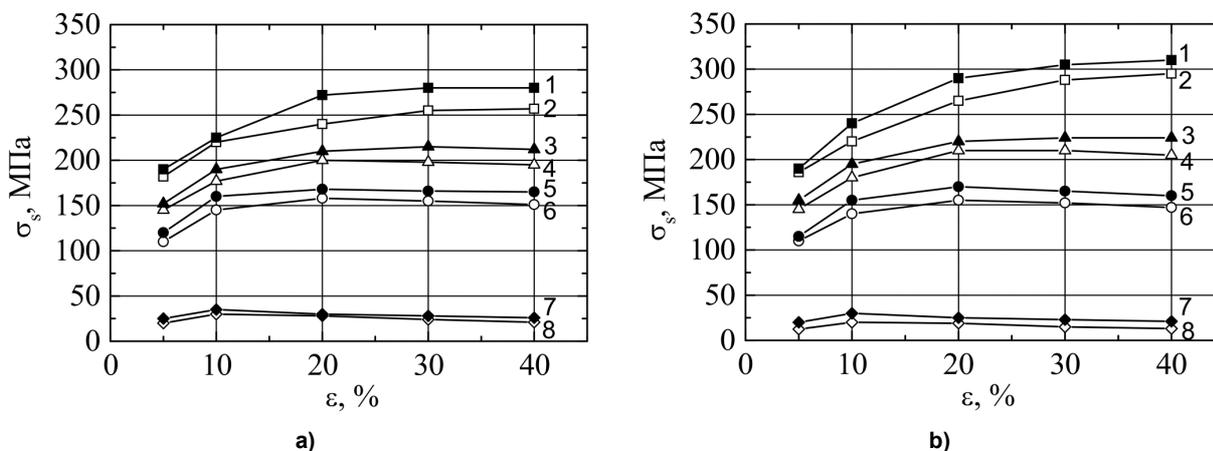


Рис. 2. Сопротивление сплава деформации: 1, 2 – деформирование при 20 °С; 3, 4 – деформирование при 150 °С; 5, 6 – деформирование при 200 °С; 7, 8 – деформирование при 545 °С; 1, 3, 5, 7 – закалённое состояние; 2, 4, 6, 8 – литое состояние

Fig. 2. Alloy resistance to deformation: 1, 2 – deformation at 20 °С; 3, 4 – deformation at 150 °С; 5, 6 – deformation at 200 °С; 7, 8 – deformation at 545 °С; 1, 3, 5, 7 – hardened state; 2, 4, 6, 8 – cast condition

литое состояние (трещина на боковой поверхности образцов – при осадке на 56 %).

Таким образом, литейный алюминиевый сплав обладает достаточной пластичностью и может быть упрочнен с использованием деформации с умеренными степенями обжатия (до 30 %) в технологических схемах НТМО и ВТМО.

Для исследованного литейного алюминиевого сплава после деформации со степенью 15...30 % наблюдалась та же зависимость от температуры прокатки, что и для деформируемых стареющих сплавов. Эти сплавы интенсивно упрочняются при холодной деформации, но в большей мере повышение твердости имеет место в случае деформации при температурах 150...170 °С, т. е. в интервале температур интенсивного дисперсионного твердения. При этом эффект упрочнения возрастает с увеличением степени деформации от 15 до 30 %.

Повышение температуры деформации до 200...450 °С для исследованного сплава в сильной мере интенсифицирует распад твердого раствора во время проведения обработки, который в отличие от прокатки при более низких температурах сопровождается выделением малодисперсных фаз. В результате твердость деформированных образцов падает до уровня, близкого к твердости, соответствующей закаленному состоянию.

Высокотемпературная пластическая деформация, осуществляемая при температуре гомогенизации сплава (545 °С), дает относительно небольшой эффект упрочнения, величина которого определяется в основном степенью наклепа матрицы. Как показали исследования микроструктуры, процессы рекристаллизации во время проведения обработки получают незначительное развитие.

Величина рекристаллизованного объема в сплаве не превышала 5...12 % (рис. 1d). Отметим, что ВТМО приводит к образованию четко выраженной зубчатости на границах зерен (см. рис. 1d). Амплитуда зубчатости составляет 0,8...1,5 мкм и мало зависит от степени деформации. Коэффициент неравноосности зерен в деформированных образцах меняется от 0,50 до 0,38 при степенях деформации 15 и 30 % соответственно. Снижение температуры прокатки с 545 до 500 °С и тем более до 450 °С уменьшает уровень прочности сплава, что обусловлено развитием процессов распада пересыщенного твердого рас-

твора во время подстуживания и деформации с выделением малодисперсных продуктов.

Таким образом, сплав может быть упрочнен НТМО, когда распад твердого раствора в основном ограничивается зонной стадией, либо ВТМО с деформацией при температуре 545 °С, при которой распад твердого раствора исключен, а процессы динамической и статической рекристаллизации в существенной мере подавлены.

Влияние термомеханической обработки на кинетику старения, свойства и характер разрушения высокопрочных литейных алюминиевых сплавов

Высокотемпературная термомеханическая обработка хотя и заметно слабее, чем НТМО, но вполне ощутимо повышает прочностные свойства литейного алюминиевого сплава: в большинстве случаев значения пределов текучести и прочности возрастают на 25...35 МПа, т. е. на 8...17 %. Одновременно такая обработка значительно увеличивает пластичность сплава (δ возрастает с 7...8 до 10...12 %).

При повышении температуры старения до 190 °С прочностные характеристики сплава, подвергнутого термомеханической обработке, также остаются выше аналогичных характеристик сплава, обработанного по стандартному режиму. Отметим, что старение при температуре 190 °С продолжительностью 4 ч, несколько понижая уровень прочностных характеристик, приводит к некоторому повышению пластичности сплава после всех исследованных режимов обработки.

Наибольшее упрочнение сплава (до НВ 145...146) обеспечивает деформация при 170 °С с обжатием 30 % и последующим старением при 170 °С продолжительностью 6...8 ч. Высокотемпературная деформация при 545 °С после старения дает относительно небольшое повышение твердости по сравнению с недеформированным состоянием. Это обусловлено как меньшим наклепом матрицы, так и меньшей интенсификацией процессов распада твердого раствора.

Холодная деформация со степенью 30 % с последующим старением при 170 °С 10 ч, существенно повышая прочностные характеристики сплава по сравнению с закаленным состоянием (σ_B возрастает на 8 %, $\sigma_{0,2}$ – на 17 %), заметно снижает пластичность (значения δ составляют 4,9...5,1 %). Повышение температуры деформационного воздействия до 170 °С

в сочетании с последующим старением при тех же температурах позволяет получить наиболее высокий уровень прочностных характеристик сплава (σ_B повышается на 12 %, а $\sigma_{0,2}$ – на 22 %) при достаточном уровне δ (6,0...6,1 %).

ВТМО в состаренном состоянии приводит к небольшому дополнительному упрочнению. Прокатка при температуре закалки после 10-часового старения при 170 °С увеличивает σ_B и $\sigma_{0,2}$ на 16 и 40 МПа, т. е. на 3,8 и 8,8 % соответственно. При этом следует отметить, что ВТМО благоприятно влияет на пластичность литейного алюминиевого сплава, повышая значение δ с 8,3 до 12 %, а относительного сужения (ψ) – с 14,5 до 20,4 %.

Таким образом, установлена возможность существенного повышения прочностных характеристик высокопрочного литейного алюминиевого сплава путем проведения обработки в режиме НТМО. Деформация при температуре гомогенизации (ВТМО) незначительно повышает прочностные характеристики исследованных сплавов, но при этом заметно увеличивает их пластичность.

С целью выяснения причин повышения пластичности после ВТМО проводили фрактографическое исследование изломов разрывных образцов. Однако надежно интерпретировать характер их разрушения оказалось весьма сложно.

В связи с этим из заготовок сплава, подвергнутых обычной термической обработке и ВТМО, были изготовлены образцы для динамических испытаний. При комнатной температуре испытаний ударная вязкость образцов, подвергнутых ВТМО (КСУ 0,14...16 МДж/м²), была несколько выше, чем у недеформированных (КСУ 0,10...12 МДж/м²).

Визуальное изучение вида изломов образцов сплава, подвергнутых разрушению в закаленном состоянии, свидетельствует о том, поверхность излома имеет однородное строение без заметных следов макропластической деформации в зоне надреза. Фрактографический анализ изломов показал, что при динамическом нагружении разрушение недеформированного сплава, состаренного при 170 °С, имеет смешанный характер: оно осуществляется по телу и границам зерен (рис. 3а). Если по

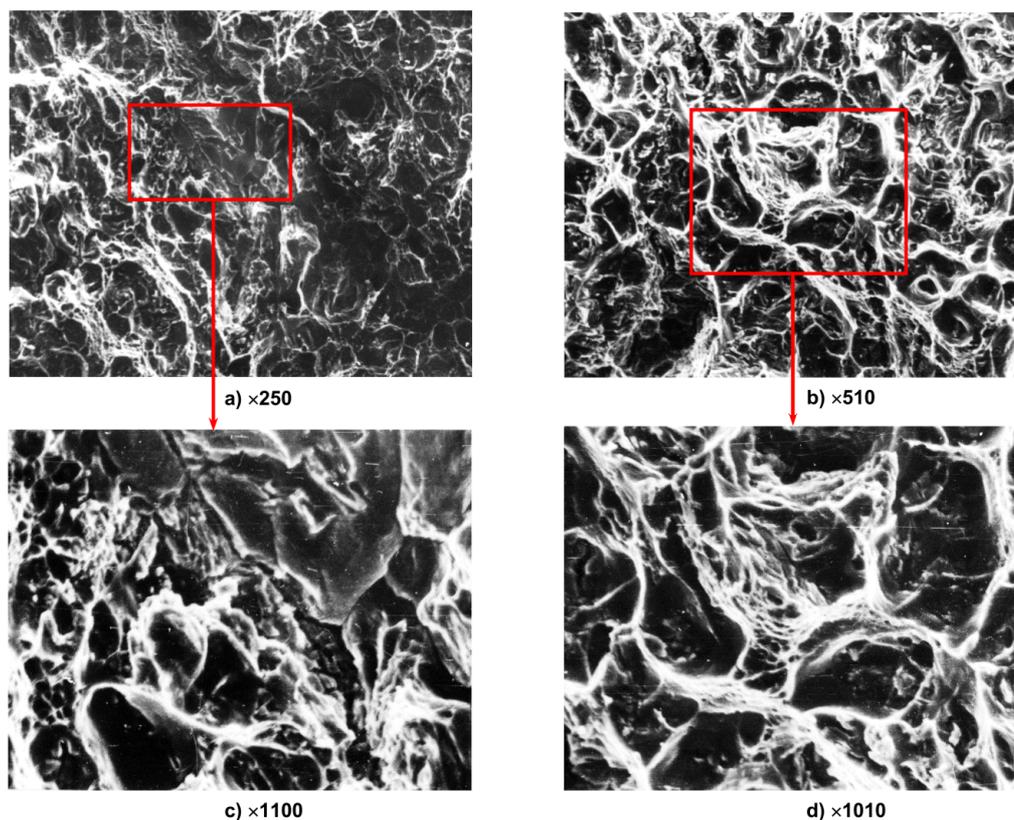


Рис. 3. Характер разрушения ударных образцов сплава: а, с – закалка + старение 170 °С, 10 ч; б, d – ВТМО + старение 170 °С, 10 ч

Fig. 3. Nature of destruction of impact alloy samples: а, с – hardening + aging 170 °С, 10 h; б, d – out-of-furnace heat treatment + aging 170 °С, 10 h

телу зерна разрушение происходило вязко путем образования и коалесценции микропор, то по границам зерен оно осуществлялось хрупко.

ВТМО, осуществляемая с деформацией при температуре нагрева под закалку и с последующим немедленным охлаждением в воде после завершения формоизменения, приводит к улучшению вида излома: появляется значительная зона боковой утяжки и четко выраженная зона долома. Фрактографическими исследованиями установлено, что ВТМО не изменила характера разрушения, но при этом проявлялась устойчивая тенденция к уменьшению доли излома, занятого зернограницными фасетками (рис. 3b). Эти данные позволяют предполагать, что ВТМО в литейных алюминиевых сплавах, как и в стареющих деформируемых, затрудняет интеркристаллитное разрушение. Это может быть одной из причин повышения пластичности данных сплавов после такой обработки.

Выводы

1. Определены зависимости сопротивления деформации литейного алюминиевого сплава в диапазоне температур проведения

его термомеханической обработки и оценена их пластичность. Установлено, что сплав независимо от исходного структурного состояния (литая структура, закаленное состояние) можно подвергать термомеханической обработке с умеренными (до 30 %) степенями деформации без нарушения сплошности заготовки.

2. Наибольший эффект упрочнения сплава достигается при НТМО с деформацией 30 % в районе температур оптимального старения, причем при таком режиме обработки пластичность литейных алюминиевых сплавов снижается в меньшей мере, чем при использовании холодной деформации.

3. ВТМО обеспечивает некоторое повышение прочностных характеристик литейного алюминиевого сплава при одновременном увеличении пластичности.

4. Пластическая деформация оказывает интенсифицирующее влияние на процессы старения литейных алюминиевых сплавов. Особенно интенсивно ускоряет распад твердого раствора при старении предварительная деформация, проводимая при температурах дисперсионного твердения.

Список литературы

1. Карева Н.Т., Корягин Ю.Д. Термомеханическая обработка стареющих алюминиевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 9 (711). С. 28–33.
2. Корягин Ю.Д., Шабурова Н.А. Структура и свойства литейного сплава АЛ9, подвергнутого термомеханическому упрочнению // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2007. Вып. 8, № 13. С. 32–35.
3. Фридлянддер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: *Металлургия*, 1979. 208 с.
4. *Металловедение алюминия и его сплавов: справ.* / А.И. Беляев, О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: *Металлургия*, 1983. 280 с.
5. Аристова Н.А., Колобнев И.Ф. Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов. М.: *Металлургия*, 1977. 143 с.
6. О механизме упрочнения сплава АЛ19 при микролегировании кадмием / П.С. Попель, В.М. Замятин, Ю.А. Базин, Б.П. Домашников // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1983. № 8. С. 39–42.
7. Колачев Б.А., Габидуллин Р.М., Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: *Металлургия*, 1980. 280 с.
8. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ. М.: *Металлургия*, 1979. 432 с.
9. Установка для исследования сопротивления деформации металлов и сплавов при прокатке / В.Н. Выдрин, В.П. Смолин, В.И. Крайнов и др. // *Сталь*. 1980. № 12. С. 1085–1087.
10. Корягин Ю.Д., Крайнов В.И., Кропачев В.Г. Термомеханическое упрочнение литейного алюминиевого сплава АЛ9 // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1999. № 2. С. 34.

References

1. Kareva N.T., Koryagin Yu.D. Thermomechanical treatment of aging aluminum alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment*. 2014;9(711):28–33. (In Russ.)
2. Koryagin Yu.D., Shaburova N.A. [Structure and properties of the AL9 cast alloy subjected to thermo-mechanical hardening]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2007;8(13):32–35. (In Russ.)
3. Fridlyandder I.N. *Alyuminiyevye deformiruemye konstruktsionnye splavy* [Aluminum wrought structural alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1979. 208 p. (In Russ.)
4. Belyaev A.I., Bochvar O.S., Buynov N.N. et al. *Metallovedenie alyuminiya i ego splavov: sprav.* [Metal science of aluminum and its alloys]. 2nd revised ed., Moscow: Metallurgiya Publ.; 1983. 280 p. (In Russ.)
5. Aristova N.A., Kolobnev I.F. *Termicheskaya obrabotka liteynykh alyuminiyevykh splavov* [Heat treatment of cast aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1977. 143 p. (In Russ.)
6. Popel' P.S., Zamyatin V.M., Bazin Yu.A., Domashnikov B.P. [On the mechanism of hardening of the AL19 alloy during microalloying with cadmium]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment*. 1983;8:39–42. (In Russ.)
7. Kolachev B.A., Gabidullin R.M., Piguzov Yu.V. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki tsvetnykh metallov i splavov* [Technology of heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1980. 280 p. (In Russ.)
8. *Alyuminiyevye splavy. Struktura i svoystva polufabrikatov iz alyuminiyevykh splavov: spravochnik* [Aluminum alloys. Structure and properties of semi-finished products from aluminum alloys. Ref. ed.]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1979. 432 p. (In Russ.)
9. Vydrin V.N., Smolin V.P., Kraynov V.I. et al. [Installation for the study of resistance to deformation of metals and alloys during rolling]. *Stal'*. 1980;12:1085–1087. (In Russ.)
10. Koryagin Yu.D., Kraynov V.I., Kropachev V.G. [Thermomechanical hardening of cast aluminum alloy AL9]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous metallurgy*. 1999;2:34. (In Russ.)

Информация об авторах

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

Стенников Михаил Анатольевич, канд. хим. наук, старший преподаватель кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; stennkovma@susu.ru.

Information about the authors

Yuriy D. Koryagin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; koriaginyd@susu.ru.

Mikhail A. Stennikov, Cand. Sci. (Chem.), Senior Lecturer of the Department of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; stennkovma@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 13.05.2023

The article was submitted 13.05.2023