

# Металловедение и термическая обработка Physical metallurgy and heat treatment

Научная статья  
УДК 669.017  
DOI: 10.14529/met250102

## ОСОБЕННОСТИ РАСПАДА ТВЕРДОГО РАСТВОРА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛИТЕЙНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, ПОДВЕРГНУТОГО ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Ю.Д. Корягин**, [koriaginyd@susu.ru](mailto:koriaginyd@susu.ru)  
**М.А. Стенников**, [stennkovma@susu.ru](mailto:stennkovma@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Для повышения комплекса механических свойств алюминиевых сплавов возможно использовать деформационную и термическую обработки. Повышение прочностных характеристик при повышении пластичности и ударной вязкости обеспечивается высокотемпературной термомеханической обработкой. Изучена возможность осуществления термомеханической обработки литейных алюминиевых сплавов. Для оценки прокаливаемости, являющейся важнейшей характеристикой высокопрочного литейного алюминиевого сплава, построена диаграмма изотермического распада пересыщенного твердого раствора. Кривые распада твердого раствора приведены для недеформированного и деформированного литейного сплава с оптимальной степенью деформации 30 %. Начало распада пересыщенного твердого раствора фиксировалось по снижению прочностных характеристик по сравнению с уровнем свойств закаленного и состаренного сплава. Установлено, что при осуществлении ВТМО горячая пластическая деформация, проводимая при температуре гомогенизации, интенсифицирует распад пересыщенного твердого раствора высокопрочных литейных алюминиевых сплавов в процессе последующего охлаждения и уменьшает прокаливаемость.

**Ключевые слова:** термомеханическая обработка, литейные алюминиевые сплавы, диаграмма распада пересыщенного твердого раствора

**Для цитирования:** Корягин Ю.Д., Стенников М.А. Особенности распада твердого раствора высокопрочного литейного алюминиевого сплава, подвергнутого пластической деформации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 1. С. 22–27. DOI: 10.14529/met250102

Original article  
DOI: 10.14529/met250102

## FEATURES OF DECOMPOSITION OF A SOLID SOLUTION OF HIGH-STRENGTH CASTING ALUMINUM ALLOY SUBJECT TO PLASTIC DEFORMATION

**Yu.D. Koryagin**, [koriaginyd@susu.ru](mailto:koriaginyd@susu.ru)  
**M.A. Stennikov**, [stennkovma@susu.ru](mailto:stennkovma@susu.ru)  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** To improve the complex of mechanical properties of aluminum alloys, it is possible to use deformation and heat treatment. Increase in strength characteristics with increasing ductility and impact toughness is ensured by high-temperature thermomechanical treatment. The possibility of implementing thermomechanical treatment of cast aluminum alloys has been studied. To estimate hardenability, which is the most important characteristic of high-strength cast aluminum alloy, a diagram of isothermal decomposition of a supersaturated solid solution has been constructed. The curves of decomposition of the solid solution are given for undeformed and deformed cast alloy with an optimal degree of deformation of 30 %. The onset of decomposition of the supersaturated solid solution was recorded by a decrease in strength characteristics compared to the level of properties of the quenched and aged alloy. It has been established

that when implementing HTMT, hot plastic deformation, carried out at the homogenization temperature, intensifies the decomposition of the supersaturated solid solution of high-strength cast aluminum alloys during subsequent cooling and reduces hardenability.

**Keywords:** thermomechanical treatment, cast aluminum alloys, diagram of the decomposition of the supersaturated solid solution

**For citation:** Koryagin Yu.D., Stennikov M.A. Features of decomposition of a solid solution of high-strength casting aluminum alloy subject to plastic deformation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(1):22–27. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250102

Улучшение комплекса свойств металлов и сплавов, обеспечивающих надежность и долговечность работы машин и механизмов является важнейшей научно-технической задачей. Для снижения собственного веса конструкций при высокой удельной прочности и жесткости широко применяют легкие сплавы на алюминиевой и магниевой основах [1–3]. С целью повышения прочностных характеристик этих сплавов могут быть использованы деформационная и термическая обработки.

Деформационной упрочняющей обработке, в основном, подвергаются сплавы, не склонные к дисперсионному твердению. Для повышения прочностных свойств деформируемых алюминиевых сплавов чаще всего используется умеренная холодная пластическая деформация (до 20...40 %).

Для дисперсионно-твердеющих сплавов на основе алюминия и магния могут быть использованы различные схемы термомеханической обработки. К основным видам такой обработки относят низкотемпературную и высокотемпературную термообработки (НТМО и ВТМО).

В случае НТМО [4] сплав после закалки подвергается холодной деформации и последующему естественному или искусственному одно- или двухступенчатому старению. При оптимально подобранных режимах деформации и старения можно получить повышенные прочностные характеристики при сохранении достаточно высокой пластичности.

Некоторое увеличение прочностных характеристик при одновременном повышении пластичности ударной вязкости дисперсионно твердеющих сплавов обеспечивается ВТМО [4], которая предполагает пластическую деформацию при температурах нагрева под закалку или несколько ниже нее и последующее быстрое охлаждение с целью получения не только пересыщенного твердого раствора, но и исключение рекристаллизации деформированной матрицы. Окончательной операцией является старение алюминиевого сплава.

При создании технологических процессов обработки, включая ВТМО, важно знать, как изменится прокаливаемость сплава под влиянием высокотемпературной деформации. Как известно [5, 6], горячая пластическая деформация, проводимая при температуре нагрева под закалку, интенсифицирует распад пересыщенных твердых растворов деформируемых алюминиевых сплавов в процессе последующего охлаждения и уменьшает их прокаливаемость.

подавляющее большинство исследований по термической обработке выполнено на полуфабрикатах и изделиях, которые на стадии металлургического передела подвергались пластической деформации. В то же время в промышленности находят широкое применение литейные алюминиевые сплавы. Представляется важным выяснить возможность осуществления термомеханической обработки этих сплавов, отличающихся от деформируемых особенностями легирования, склонностью к дисперсному твердению и типом выделяющихся фаз.

В работе [7] исследовались структура и свойства литейного сплава АЛ9, подвергнутому термомеханическому упрочнению при различных температурах и степенях деформации. Установлено, что НТМО существенно повышает прочностные свойства сплава при заметном снижении пластичности. Возможно повышение пределов текучести и прочности сплава на 22 и 18 % соответственно. В отличие от НТМО высокотемпературная механическая обработка данного сплава приводит к заметно меньшему упрочнению, но сопровождается повышением пластичности и снижением склонности к хрупкому разрушению.

В работе [8] изучено влияние деформации на механические свойства высокопрочного литейного алюминиевого сплава при различных степенях деформации и температурах. Материалом исследования служил литейный алюминий-магниевый сплав, характеризующийся высокой прочностью при комнатной

Химический состав литейного алюминиевого сплава (масс. %)  
Chemical composition of cast aluminum alloy (wt. %)

Al	Si	Cu	Mn	Mg	Ti	Cd	Zr	Zn	Fe
Ост.	0,11	4,50	0,49	0,03	0,26	0,11	0,05	0,09	0,14

температуре и повышенной жаропрочностью, применяемый в качестве конструкционного материала для изготовления ряда деталей ответственного назначения. Химический состав сплава приведен в таблице.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что сплав можно подвергать термомеханической обработке с умеренными (до 30 %) степенями деформации независимо от исходного структурного состояния (литая структура, закаленное состояние). Показано, что наибольший эффект упрочнения сплава достигается при НТМО со степенью деформации 30 % в районе температур оптимального старения, при этом пластичность литейных сплавов снижается в меньшей мере, чем при проведении холодной деформации. Также было установлено, что пластическая деформация оказывает интенсифицирующее влияние на процессы старения литейного алюминиевого сплава, причем наибольшая скорость распада твердого раствора достигается при проведении пластической деформации при температуре дисперсионного твердения.

При создании технологических процессов ВТМО важно знать характер изменения прокаливаемости сплава под влиянием высокотемпературной деформации. Для оценки прокаливаемости построена С-образная диаграмма изотермического распада пересыщенного твердого раствора высокопрочного литейного алюминиевого сплава по методике, изложенной в работе [9]. Заготовки сечением 30×15 мм и 4,3×15 мм после 7-часовой гомогенизации при 545 °С переохлаждали в соляной ванне до 400...250 °С с последующей изотермической выдержкой и закалкой в воде. Часть заготовок толщиной 4,3 мм перед изотермической выдержкой подвергали прокатке со скоростью 1 с<sup>-1</sup> и степенью деформации 30 %. После деформации они имели такую же толщину, что и недеформированные заготовки. Окончательной операцией являлось 10-часовое старение при 170 °С, обеспечивающее получение максимальной прочности. Из заготовок изготавливались плоские образцы для испытаний на растяжение. Начало распада пересыщенного твердого раствора фиксировали при меха-

нических испытаниях по снижению прочностных характеристик на 2 % по сравнению с уровнем свойств закаленного и состаренного сплава.

Характер изотермического распада пересыщенного твердого раствора высокопрочного литейного алюминиевого сплава, подвергнутого горячей пластической деформации и недеформированного, иллюстрирует С-образные кривые (см. рисунок).

Пластическая деформация при температуре гомогенизации существенно ускоряет распад пересыщенного твердого раствора высокопрочного алюминиевого сплава, что проявляется как в уменьшении инкубационного периода (для недеформированного сплава – 12 с, а для деформированного 5 с), так и в увеличении скорости распада. Уменьшение минимального инкубационного периода превращения приводит к увеличению критической скорости закалки, рассчитанной из С-образных диаграмм по формуле согласно [9]:

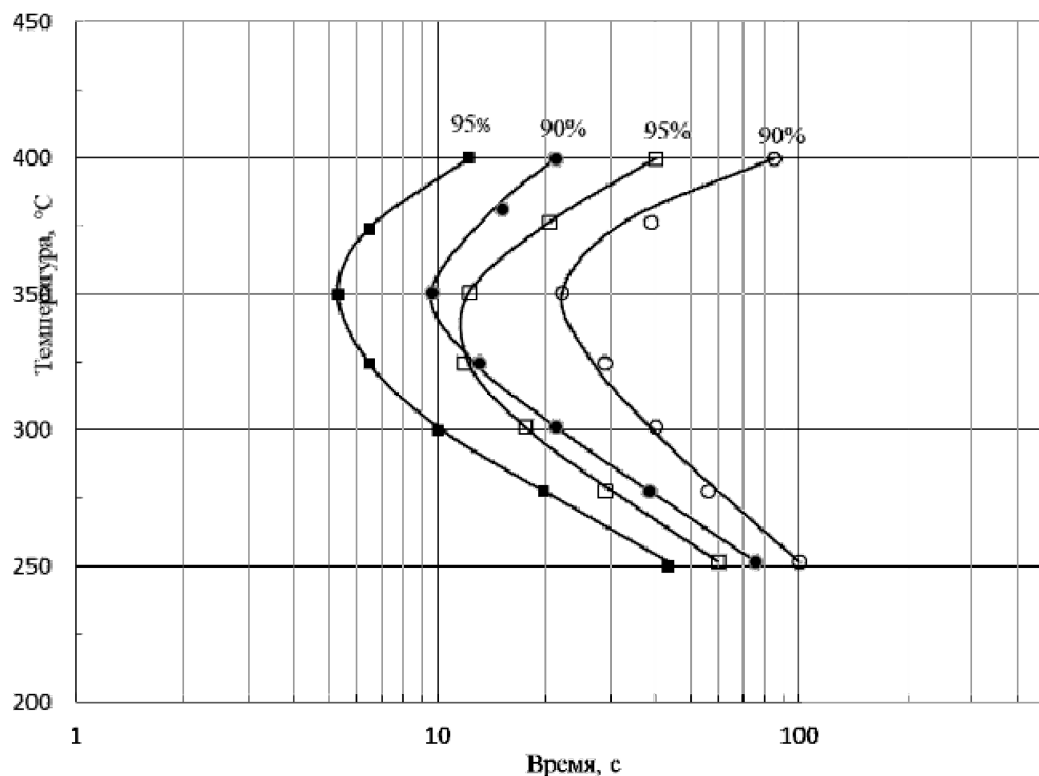
$$V_{кр} = \frac{t_{зак} - t_{мин}}{(1,1...1,2) \cdot \tau_{мин}},$$

где  $t_{зак}$  – температура нагрева под закалку, °С;  $t_{мин}$  – температура минимальной устойчивости твердого раствора, °С;  $\tau_{мин}$  – инкубационный период при температуре  $t_{мин}$ ; (1,1...1,2) – коэффициент, учитывающий запаздывание превращений по сравнению с изотермическими в условиях непрерывного охлаждения.

Проведенные расчеты показывают, что для недеформируемого сплава  $V_{кр} = 14,2$  град./с, а для деформированного (545 °С, 30 %) –  $V_{кр} = 34,16$  град./с.

Аналогично горячая деформация влияет и на распад пересыщенного раствора сплава АЛ9 [10]. Проведенные эксперименты и расчеты показывают, что для недеформированного сплава АЛ9 критическая скорость закалки  $V_{кр} = 13,78$  град./с, а для деформированного –  $V_{кр} = 29,54$  град./с.

Таким образом, установлено, что пластическая деформация оказывает интенсифици-



Кривая изотермического распада пересыщенного твердого раствора. Цифры у кривых показывают количество твердого раствора. □, ○ – без деформации; ■, ● – деформация 30 %  
 Isothermal decomposition curve of a supersaturated solid solution. The numbers on the curves show the amount of solid solution. □, ○ – without deformation; ■, ● – 30 % deformation

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

### Выводы

1. Рассчитаны критические скорости заковки недеформированных и подвергнутых деформации сплавов.
2. Экспериментально определены критические скорости заковки для деформированных и недеформированных сплавов при оптимальной степени деформации.

3. Построена диаграмма распада пересыщенного твердого раствора высокопрочного алюминиевого сплава.

4. Установлено хорошее соответствие скоростей заковки, определенных расчетным путем, скоростям заковки, найденным экспериментально.

5. При осуществлении ВТМО горячая пластическая деформация, проводимая при температуре гомогенизации, интенсифицирует распад пересыщенного твердого раствора высокопрочных литейных алюминиевых сплавов в процессе последующего охлаждения и уменьшает прокаливаемость.

### Список литературы

1. Алюминий: металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов / пер. с англ. под ред. А.Т. Туманова, Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1972. 664 с.
2. Фридляндер И.Н. Конструкционные алюминиевые сплавы // Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. № 4. С. 2–8.
3. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
4. Рабинович М.Х. Термомеханическая обработка алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 160 с.

5. Смирнов М.А., Лапина И.В., Ушаков В.Г. Влияние горячей пластической деформации на изотермический распад пересыщенного твердого раствора алюминиевого сплава // Физика металлов и металловедение. 1993. Т. 76, вып. 2. С. 140–143.

6. Лапина И.В. Формирование структуры и свойств высокопрочного алюминиевого сплава при термической и термомеханической обработках: дис. канд. ... техн. наук. Челябинск: ЧГТУ, 1995.

7. 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.

8. 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

9. Диаграммы изотермического распада раствора в алюминиевых сплавах: справ. / В.Г. Давыдов, В.В. Захаров, Е.Д. Захаров, И.И. Новиков. М.: Metallurgiya, 1973. 152 с.

10. Корягин Ю.Д. Структура, свойства и термическая стабильность легких сплавов и сталей, подвергнутых деформационной и термомеханической обработкам: дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2003.

### References

1. *Alyuminiy: metallovedenie, obrabotka i primeneniye alyuminiyevykh splyavov* [Aluminum: physical metallurgy, processing and application of aluminum alloys]. Transl. from Engl. edited by A.T. Tumanov, F.I. Kvasov, I.N. Friedlander. Moscow: Metallurgiya; 1972. 664 p. (In Russ.)

2. Fridlyander I.N. [Structural aluminum alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment*. 1990;(4):2–8. (In Russ.)

3. Fridlyander I.N. *Alyuminiyevye deformiruemye konstruktsionnye splyavy* [Aluminum wrought structural alloys]. Moscow: Metallurgiya; 1979. 208 p. (In Russ.)

4. Rabinovich M.Kh. *Termomekhanicheskaya obrabotka alyuminiyevykh splyavov* [Thermomechanical processing of aluminum alloys]. Moscow: Mashinostroenie; 1972. 160 p. (In Russ.)

5. Smirnov M.A., Lapina I.V., Ushakov V.G. Influence of hot deformation on isothermal decomposition of supersaturated solid solution of aluminium alloy. *Physics of Metals and Metallography*. 1993;76(2).

6. Lapina I.V. *Formirovaniye struktury i svoystv vysokoprochnogo alyuminiyevogo splyava pri termicheskoy i termomekhanicheskoy obrabotkakh: dis. kand. tekhn. nauk* [Formation of structure and properties of high-strength aluminum alloy during thermal and thermomechanical treatments. Cand. sci. diss.]. Chelyabinsk: ChSTU; 1995. (In Russ.)

7. Koryagin Yu.D., Shaburova N.A. [Structure and properties of casting alloy AL9 subjected to thermomechanical strengthening]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2007;8(13):32–35. (In Russ.)

8. 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

9. Davydov V.G., Zakharov V.V., Zakharov E.D., Novikov I.I. *Diagrammy izotermicheskogo raspada rastvora v alyuminiyevykh splyavakh: spravochnik* [Diagrams of isothermal decomposition of a solution in aluminum alloys. Reference book]. Moscow: Metallurgiya; 1973. 152 p. (In Russ.)

10. Koryagin Yu.D. *Struktura, svoystva i termicheskaya stabil'nost' legkikh splyavov i staley, podvergnytykh deformatsionnoy i termomekhanicheskoy obrabotkam: dis. d-ra tekhn. nauk* [Structure, properties and thermal stability of light alloys and steels subjected to deformation and thermomechanical treatments. Doct. sci. diss.]. Chelyabinsk: South Ural State University; 2003. (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 30.12.2024***

***The article was submitted 30.12.2024***