

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВО- МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Обитов Насриддин Мехриевич - старший  
преподаватель Навоийского государственного  
горного института*

**Аннотация.** Термическая обработка является одним из инструментов повышения эксплуатационных свойств деталей, конструкций, изготовленных, в частности, из сплавов на основе алюминия. Современная классификация алюминиевых сплавов делит их на термически упрочняемые и не упрочняемые. Разница между двумя группами сплавов заключается в степени их упрочнения в закаленном состоянии. Эффект упрочнения достигается за счет образования пересыщенных твердых растворов за счет второй фазы-растворителя на основе легирующего элемента. Изучение фазового состава и наноструктуры вторичных алюминиевых сплавов показал новый эффект упрочнения алюминиевых сплавов. Экспериментально доказана возможность упрочнения сплавов на основе алюминия после закалки и последующего старения, в том числе, термически не упрочняемых алюминиевых сплавов, содержащих повышенное количество примесей. В работе приведены результаты экспериментов по повышению прочностных свойств модельных сплавов типа литейных магналиев, приготовленных из лома и отходов. Показаны механические свойства в литом и термическом обработанном состояниях, а также фазовый состав исследованных сплавов.

**Ключевые слова:** старения, механические свойства, сплавы, концентрации примесей, эффект старения, структура, контраст

**Аннотация.** Термик ишлов бериш, хусусан, алюминий асосидаги қотишмалардан тайёрланган деталлар ва тузилмаларнинг ишлаш хусусиятларини яхшилаш воситаларидан биридир. Алюминий қотишмаларининг замонавий таснифи уларни термик ишлов бериш билан мустаҳкамланадиган ва мустаҳкамланмайдиган турларга ажратади. Қотишмаларнинг икки гуруҳи ўртасидаги фарқ уларнинг тоблангандан кейинги ҳолатда мустаҳкамланиши даражасидадир. Мустаҳкамланиш эффекти қотишма элементга асосланган иккинчи ҳал қилувчи фаза туфайли ўта тўйинган қаттиқ қотишмалар ҳосил бўлиши туфайли эришилади. Иккиламчи алюминий қотишмаларининг фазавий таркиби ва наноструктурасини ўрганиш алюминий қотишмаларининг мустаҳкамланишининг янги таъсирини кўрсатди. Алюминий асосидаги қотишмаларни тоблаш ва кейинчалик қаритишдан кейин мустаҳкамланиш эҳтимоли шу жумладан, кўп миқдорда аралашмалар бўлган термик ишлов берилмайдиган алюминий қотишмаларида ҳам экспериментал равишда исботланган. Мақолада бўлақлар ва чиқиндилардан тайёрланган қуйма магналиялар каби модель қотишмаларининг мустаҳкамлик хусусиятларини яхшилаш бўйича тажрибалар натижалари келтирилган. Тадқиқ қилинган қотишмаларнинг қуйилган ва термик ишлов берилган ҳолатлардаги механик хусусиятлари кўшимчалар миқдори, шунингдек, фазавий таркиби келтирилган.

**Калит сўзлар:** қариш, механик хусусиятлар, қотишмалар, аралашмалар контсентрацияси, қариш эффекти, тузилиш, контраст.

**Annotation.** Heat treatment is one of the tools for improving the performance properties of parts and structures made, in particular, from aluminum-based alloys. The modern classification of aluminum alloys divides them into heat-hardenable and non-hardenable. The difference between the two groups of alloys lies in the degree of their hardening in the hardened state. The hardening effect is achieved due to the formation of supersaturated solid



концентрации примесей. Чтобы выяснить, насколько эффект старения зависит от примесей (в частности цинка и меди), для сплава с 6%Mg определение механических свойств проводили на трех уровнях содержания примесей. Старение проводили на закаленных по режиму 520°C, 10 ч сплавах.

На основании анализа литературных данных по сплавам Al – Mg – Zn [17 - 19] старение на первой ступени проводили при 100°C 4ч. Режим второй ступени являлся объектом оптимизации. Об эффекте старения судили по приросту твердости HV в сравнении с закаленным состоянием.

Структурный и микрорентгеноспектральный фазовый анализ проведен на оптическом микроскопе «Neophot-21» и растровом электронном микроскопе фирмы «Jeol».

В процессе исследования использованы методики, которые применяли в работах [19 - 23].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения фазового состава вторичных сплавов были приготовлены сплавы на основе системы Al – Mg с примесями, введенными порознь, попарно и вместе. Составы фаз были определены методами микрорентгеноспектрального анализа на микрошлифах, закристаллизованных в условиях, обеспечивающих равновесную кристаллизацию.

Фрагменты исследований фазового состава вторичных сплавов представлены ниже. Установлено, что магний, кремний, олово и свинец образуют сложную эвтектику (Mg,Si,Sn,Pb), которая может быть описана в виде:  $(Mg_2Si+Sn+Pb)$  или  $Mg_2(Si,Sn,Pb)$ . Микроструктура фазы представлена на рис.1а. На рис. 1б представлена сложная фаза эвтектического происхождения Al(Cu, Ni, Mn, Mg). Здесь видно, как две колонии срослись в одной точке и, возможно, наличие третьей колонии вертикально плоскости фотографии. На рис. 1в показаны сросшиеся фазы  $(Fe, Mn, Cu, Ni) Al_3$  и  $S(Al, Cu, Mg, Ni)$ .

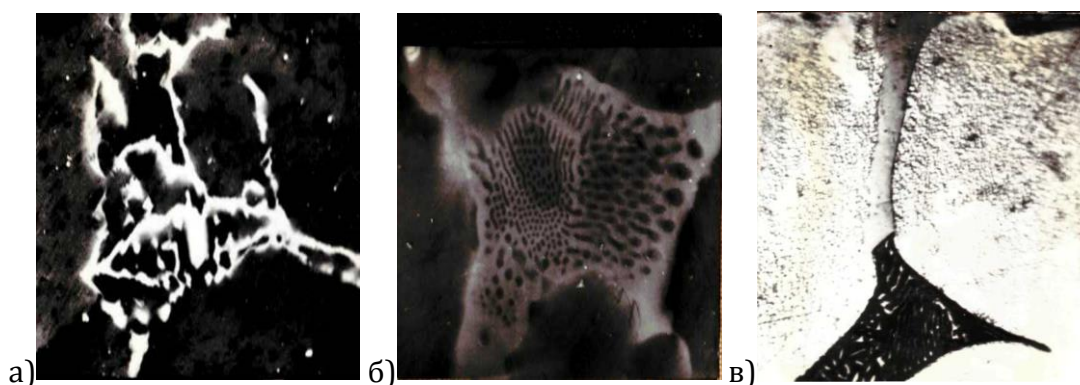
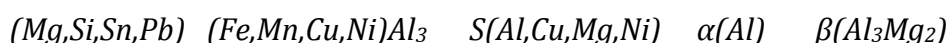
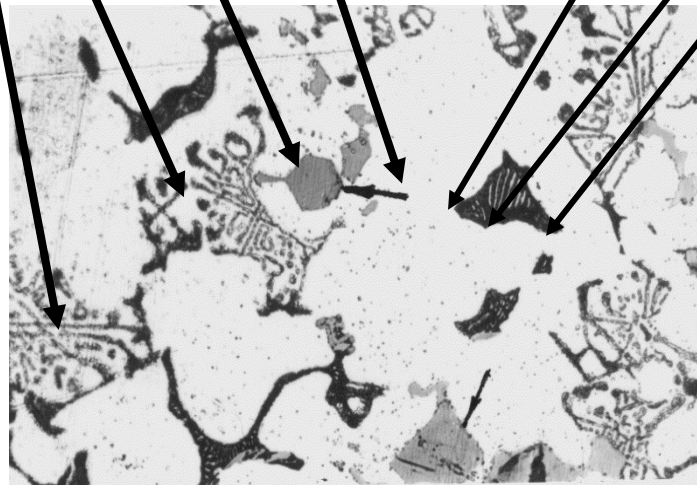


Рис. 1. Микроструктура алюминиевых сплавов а и б – растровый электронный микроскоп; в – световой микроскоп увеличение x 800

В целом микроструктура алюминиевого сплава из лома и отходов с примесями, введенными вместе, представлена на рис. 2.





**Рис.2. Микроструктура сплава с примесями, введёнными вместе - световой микроскоп, x 1000**

Фазовый состав сплава следующий:  $\alpha$ -алюминиевый твердый раствор, обогащенный цинком, медью, марганцем, никелем, магнием;  $\beta$  ( $Al_3Mg_2$ ) – фаза, которая может содержать цинк, медь, марганец; эвтектические колонии S (Al, Cu, Mg) – фазы; железистая фаза эвтектического происхождения (Al, Fe, Mn, Ni, Cu); кремнийсодержащая, сложная фаза (Mg, Si, Sn, Pb). Естественно, при наличии титана, иттрия возможно образование фаз на основе этих элементов также эвтектического происхождения [Мондольфо].

При таком сложном фазовом составе сплава, можно, ожидать при нагреве под закалку растворения некоторых фаз в твердом растворе на основе алюминия.

Известно [18 - 23], что сплавы алюминия и магния, содержащие в качестве основных легирующих элементов цинк, кремний, медь, существенно упрочняются при старении. В связи с этим, исследуемые сплавы, содержащие примеси меди и цинка в количестве 0,3...0,6% (каждой), решили подвергнуть старению с целью их дополнительного упрочнения.

Более высокий уровень прочностных и коррозионных свойств, по-видимому, должен обеспечить двухступенчатый режим старения, при котором наблюдается более высокая плотность и однородность распределения выделений [19 - 23].

На первом этапе были получены зависимости твердости сплавов от температуры T старения при времени выдержки 2ч. У сплавов с 6 и 8%Mg максимальный прирост HV наблюдали при 160°C, а у сплава с 4%Mg значения твердости после старения при различных температурах оставались практически неизменными (~HV 95).

У сплавов Al + 6% Mg с разным уровнем содержания примесей наибольшая твердость была получена после старения при температуре второй ступени 140°C для сплава с 0,6%Si, Fe, Cu, Zn, Mn; 0,3%Sn и Pb; 0,5%Ni (верхний уровень) и при 160°C с примесями на нижнем и среднем уровнях.

На следующем этапе установили зависимость твердости от времени выдержки на второй ступени старения при 140°C и при 160°C.

Из анализа кривых старения следует, что оптимальным режимом второй ступени является: температура 160°C, время выдержки 2ч. Такой режим обеспечивает прирост твердости  $\Delta HV_{10...15}$ .

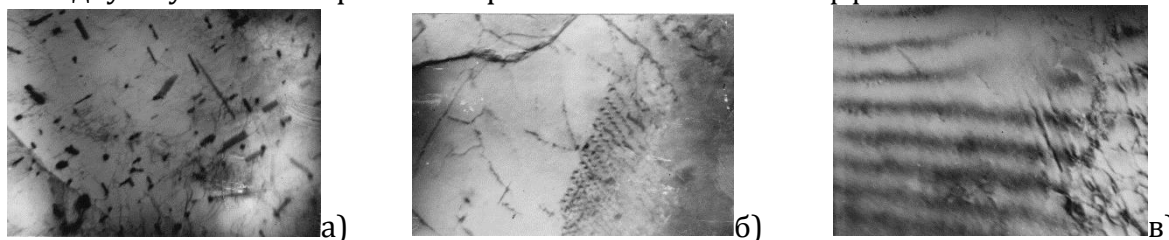


**Таблица 1. Твердость HV сплавов, состаренных по одно- и двухступенчатому режимам**

Сплав	Уровень примесей	Режим старения	Твердость HV
Al + 4%Mg	средний	одноступенчатый	89 ± 2
		двухступенчатый	96 ± 3
Al + 6%Mg	нижний	одноступенчатый	89 ± 2
		двухступенчатый	96 ± 2
Al + 6%Mg	средний	одноступенчатый	96 ± 2
		двухступенчатый	103 ± 2
Al + 6%Mg	верхний	одноступенчатый	100 ± 2
		двухступенчатый	110 ± 2
Al + 8%Mg	средний	одноступенчатый	103 ± 2
		двухступенчатый	111 ± 2

Для доказательства того, что двухступенчатый режим старения дает больший прирост HV, чем одноступенчатый, была определена твердость сплавов состаренных по одноступенчатому режиму, обеспечивающим максимальную твердость: 160°C, 2ч. Значения твердости HV сплавов системы Al-Mg с различным уровнем примесей представлены в табл.1.

Результаты исследования, представленные в табл.1 подтверждают, что для всех сплавов двухступенчатый режим старения оказался более эффективным.



**Рис.3. Тонкая структура сплава Al + 6%Mg с примесями на верхнем уровне: а – дислокационная структура в литом состоянии, x18000; б, в – тонкая структура в состаренном состоянии, x34000**

Электронно-микроскопические исследования сплава Al + 6%Mg с наибольшим содержанием примесей (для более легкого обнаружения продуктов распада), состаренного по режиму 100°C, 4ч + 160°C, 2ч, не позволили обнаружить продукты распада, вероятно из-за их дисперсности и малой объемной доли.

Структура пере старенного сплава в течение 10ч при температуре второй ступени 160°C, которую изучали с целью обнаружения продуктов распада, показана на рис.3.

Из сравнения тонкой структуры сплава в литом состоянии (рис.3а) и в состаренном следует, что в сплаве, подвергнутом старению, на дислокациях видны гетерогенно зародившееся и уже грубые к этому времени старения частицы  $\beta(\text{Al}_3\text{Mg})$  - фазы (рис.3б). На рис. 3в показаны толщенные контуры экстинкции с продуктами распада. Контраст в этом случае получается из-за наличия сильного поля упругих напряжений вокруг выделяющихся мелких частиц. Поле упругих напряжений сохраняется лишь вокруг когерентных или полукгерентных частиц [9 - 15]. Вокруг же грубых частиц они отсутствуют. Вероятно, в сплаве идет распад с образованием фазы-упрочнителя, объемная доля которой мала и, соответственно, она не оказывает заметного влияния на механические свойства. Идентифицировать эту фазу не удалось в виду малочисленности ее выделений.



Изучение кинетических кривых зависимости твердости от времени выдержки показали, что режимом старения на максимальную прочность для вторичного сплава АМг5К является: 100<sup>0</sup>С, 4 ч + 200<sup>0</sup>С, 3 ч. На образцах, обработанных, по этому режиму определяли механические свойства. Установлено, что при таком режиме старения обеспечивается повышение предела текучести по сравнению с закаленными сплавами в среднем на 85 МПа и снижение относительного удлинения на 2,4%. Такое изменение свойств, свидетельствует о распаде пересыщенного твердого раствора. Анализ электронограмм после старения сплавов позволяет предположить, что основной фазой (фазами), определяющей характер структуры, является медьсодержащая фаза S.

## ВЫВОДЫ

Изменение твердости, предела текучести, относительного удлинения при старении сплавов системы Al – Mg с повышенным содержанием примесей (в том числе меди и цинка до 0,6%) показывает, что сплавы этой группы возможно термически упрочнять.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zolotarevskii, V.S., Istomin-Kastrovskii, V.V., Mansurov, Yu.N., Tynishbaeva, A.K. Effect of Impurities on the Structure and Mechanical Properties of Casting Magnaliums. | [O VLIYANII PRIMESEI NA STRUKTURU I MEKHANICHESKIE SVOISTVA LITEINYKH MAGNALIEV.]. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Tsvetnaya Metallurgiya. 1986 (1), pp. 94 – 100.
2. Zolotarevsky, V.S., Belov, N.A., Mansurov, Yu.N. Morphology and Composition of Iron-Containing Phases in Foundry Magnaliums. | [MORFOLOGIYA I SOSTAV ZHELEZOSODERZHASHCHIKH FAZ V LITEINYKH MAGNALIYAKH.]. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Tsvetnaya Metallurgiya. 1986. (4), pp. 85 - 90.
3. Reva, V.P., Filatenkov, A.E., Mansurov, Y.N., Kuryavyi, V.G. Thermal stability of multilayer carbon nanotubes produced by the mechanical activation of amorphous carbon. // Coke and Chemistry. 2014. 57(11), pp. 444 – 447.
4. Andreeva, A.A., Mansurov, S.Yu., Miklushevskiy, D.V., Mansurov, Yu.N. Model of formation of innovation process for large industrial enterprises. // Tsvetnye Metally, 2015(3), pp. 74 – 77.
5. Miklushevskiy, D.V., Mansurov, S.Y., Pitserskaya, T.N., Mansurov, Y.N. International review of market of non-ferrous metals. // Tsvetnye Metally, 2015(9), pp. 4 – 6.
6. Miklushevskiy, D.V., Mansurov, S.Y., Pitserskaya, T.N., Mansurov, Yu.N. Economy and innovation management of universities. // Tsvetnye Metally, 2015(9), pp. 6 – 12.
7. Mansurov, Yu.N., Belov, N.A., Sannikov, A.V., Buravlev, I.Yu. Optimization of composition and properties of heatresistant complex-alloyed aluminum alloy castings. // Non-ferrous Metals. 2015, 39(2), pp. 48 – 55.
8. Mansurov, Yu.N., Kurbatkina, E.I., Buravlev, I.Yu., Reva, V.P. Features of structure's formation and properties of composite aluminum alloy ingots. // Non-ferrous Metals. 2015, 39(2), pp. 40 – 47.
9. Mansurov, Yu.N., Reva, V.P., Mansurov, S.Yu., Beloborodov, M.V. Economic and social basis of material science development in the far east. // Tsvetnye Metally. 2016, (11), pp. 88 – 93.
10. Rudnev, V.S., Nedozorov, P.M., Yarovaya, T.P., Mansurov, Yu.N. Local plasma and electrochemical oxygenating on the example of AMg5 (AMr5) alloy. // Tsvetnye Metally. 2017, (1), pp. 59 - 64.
11. Aksenov, A.A., Mansurov, Yu.N., Ivanov, D.O., Kadyrova, D.S. Foam aluminium for small business in the far east. // Tsvetnye Metally. 2017, (4), pp. 81-85.
12. Rudnev, V.S., Yarovaya, T.P., Nedozorov, P.M., Mansurov, Y.N. Wear-resistant oxide coatings on aluminum alloy formed in borate and silicate aqueous electrolytes by plasma electrolytic oxidation. // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2017, 53(3), pp. 466 - 474.
13. Aksenov, A.A., Mansurov, Y.N., Ivanov, D.O., Reva, V.P., Kadyrova, D.S., Shuvatkin, R.K., Kim, E.D. // Metallurgist. 2017, 61(5-6), pp. 475 – 484.
14. Sergeeva, A.M., Lovizin, N.S., Sosnin, A.A., Mansurov, Yu.N. Influence of continuous casting on the structure and properties of 1013 (AD1) alloy castings. // Tsvetnye Metally. 2018, (5), pp. 64 - 68.
15. Mansurov, Yu.N., Aksenov, A.A., Reva, V.P. Influence of the chill-mold casting process on the structure and properties of aluminum alloys with eutectic constituents. // Tsvetnye Metally. 2018, (5), pp. 77 - 81.
16. Mansurov, Yu.N., Rakhmonov, J.U., Letyagin, N.V., Finogeyev, A.S. Influence of impurity elements on the casting properties of Al-Mg based alloys. // Non-ferrous Metals. 2018, 44(1), pp. 24 - 29.



17. Mamadzhanov, K.A., Sergeeva, A.M., Mansurov, S.Y., Mansurov, Y.N. Continuous casting of aluminium alloys and cost effectiveness analysis. // Tsvetnye Metally. 2018, (16), pp. 6 – 13.
18. Mansurov, Y.N., Rakhmonov, J.U. Analysis of the phase composition and the structure of aluminum alloys with increased content of impurities. // Non-ferrous Metals. 2018, 45(2), pp. 37 - 42.
19. Mansurov, Y.N., Kadyrova, D.S., Rakhmonov, J. Dependence of Corrosion Resistance for Aluminum Alloys with Composition Increased Impurity Content. // Metallurgist. 2019, 62(11-12), pp. 1181 - 1186.
20. Mansurov, Y.N., Rakhmonov, J.U., Aksyonov, A.A. Modified aluminum alloys of Al – Zr system for power transmission lines of Uzbekistan. // Non-ferrous Metals. 2020, 49(2), pp. 51 - 55.
21. Mansurov, Y.N., Rakhmonov, J.U., Aksyonov, A.A. Metal-based systems allowing the use of scrap to prepare aluminum alloys // Non-ferrous Metals. 2020, 49(2), pp. 56 - 62.
22. Mansurov, Y.N., Rikhsiboev, A.R., Mansurov, S.Y. Features of Multicomponent Secondary Aluminium Alloy Structure Formation. // Metallurgist. 2020, 63(11-12), pp. 1303 - 1312.
- S. B. Sidelnikov, D. S. Voroshilov, M. M. Motkov, V. N. Timofeev, I. L. Konstantinov, N. N. Dovzhenko, E. S. Lopatina, V. M. Bepalov, R. E. Sokolov, Y. N. Mansurov, M. V. Voroshilova. Investigation structure and properties of wire from the alloy of AL-REM system obtained with the application of casting in the electromagnetic mold, combined rolling-extruding, and drawing. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, 114(9-10), pp. 2633 – 2649.