

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.791:621.771

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.012

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АМг6 И В95 НА ИХ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА**

**Михаил Николаевич Зенин<sup>1</sup>, Алексей Михайлович Гурьев<sup>2</sup>, Сергей Геннадьевич Иванов<sup>3†</sup>,  
Михаил Алексеевич Гурьев<sup>4</sup>, Евгения Владимировна Черных<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

<sup>2</sup> Уханьский текстильный университет, ул. ФангЖи, 1, 430073, Ухань, КНР

<sup>1</sup> mikhail.zenin.96@mail.ru

<sup>2</sup> gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

<sup>3</sup> serg225582@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

<sup>4</sup> gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

<sup>5</sup> jane\_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

**Аннотация.** Широкое использование в современном машиностроении конструкционных алюминиевых сплавов АМг6 и В95 привело к выявлению такой проблемы, как неоптимальная структура коммерческих полуфабрикатов из этих сплавов. Традиционные виды термической обработки не всегда позволяют достичь исправления структуры и получения высокого комплекса эксплуатационных свойств. Наиболее часто встречающимися дефектами структуры коммерческих полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, содержащих магний и цинк, является полосчатость, образованная упрочняющей интерметаллидной фазой MgZn<sub>2</sub>. Методами оптической микроскопии высокого разрешения исследована структура магниевых алюминиевых сплавов при различных режимах термической обработки, заключающейся в длительном гомогенизационном отжиге. Исследования проводили на образцах из сплавов АМг6 и В95. Для термообработки использовали камеру печи типа СНОЛ, оборудованную ПИД-регулятором, образцы загружали в предварительно разогретую до температуры 500 °С печь и выдерживали в ней в течение 8 и 16 ч. По завершении выдержки, образцы извлекали из печи и охлаждали на спокойном воздухе. Измерение твердости производили на исходных образцах, образцах после термообработки и спустя 14 суток после термообработки. Исследования показали, что увеличение времени высокотемпературной выдержки при 500 °С для обоих сплавов приводит к растворению интерметаллидных частиц. В результате происходящих структурно-фазовых превращений при дальнейшем охлаждении и последующем естественном старении, интерметаллидная фаза вновь выделяется из твердого раствора, как показали измерения твердости, произведенные на исходных образцах, затем после высокотемпературного отжига и в последующем – после естественного старения в течение 14 суток.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, микроструктура, термообработка, твердость.

**Благодарности:** Исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ.

---

**Для цитирования:** Зенин М.Н., Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В. Влияние высокотемпературного отжига алюминиевых сплавов АМг6 и В95 на их структурно-фазовое состояние и прочностные свойства // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2022. Т. 19, № 1. С. 106–114. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.012.

---

Original article

## INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE ANNEALING OF ALUMINUM ALLOYS AMg6 AND V95 ON THEIR STRUCTURAL-PHASE STATE AND STRENGTH PROPERTIES

Mikhail N. Zenin<sup>1</sup>, Alexey M. Guryev<sup>2</sup>, Sergey G. Ivanov<sup>3†</sup>, Mikhail A. Guryev<sup>4</sup>,  
Evgeniya V. Chernykh<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

<sup>2</sup> Wuhan Textile University, FangZhi Road, 1, Wuhan, 430073, China

<sup>1</sup> mikhail.zenin.96@mail.ru

<sup>2</sup> guriavam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

<sup>3</sup> serg225582@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

<sup>4</sup> gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

<sup>5</sup> jane\_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

**Abstract.** The widespread use of structural aluminum alloys AMg6 and B95 in modern mechanical engineering has led to the identification of such a problem as the non-optimal structure of commercial semi-finished products from these alloys. Traditional types of heat treatment do not always make it possible to correct the structure and obtain a high complex of operational properties. The most common structural defects in commercial semi-finished aluminum alloys containing magnesium and zinc are banding formed by the strengthening intermetallic phase MgZn<sub>2</sub>. The structure of magnesium-aluminum alloys has been studied by high-resolution optical microscopy under various heat treatment modes, which include long-term homogenization annealing. The studies were carried out on samples of AMg6 and V95 alloys. For heat treatment, a chamber furnace of the SNOL type equipped with a PID controller was used; the samples were loaded into a furnace preheated to a temperature of 500 °C and kept in it for 8 and 16 hours. After the exposure was completed, the samples were removed from the furnace and cooled in still air. The hardness was measured on the original samples, samples after heat treatment and 14 days after heat treatment. Studies have shown that an increase in the time of high-temperature holding at 500 °C for both alloys leads to the dissolution of intermetallic particles. As a result of the ongoing structural-phase transformations during further cooling and subsequent natural aging, the intermetallic phase again precipitates from the solid solution, as shown by hardness measurements made on the original samples, then after high-temperature annealing and subsequently after natural aging for 14 days.

**Keywords:** aluminum alloys, microstructure, heat treatment, hardness.

**Acknowledgements:** The studies were carried out at the Center for Collective Use of AltSTU.

**For citation:** Zenin, M. N., Guryev, A. M., Ivanov, S. G., Guryev, M. A. & Chernykh E. V. (2022). Influence of high-temperature annealing of aluminum alloys AMg6 and V95 on their structural-phase state and strength properties. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(19), 106–114. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.012.

### Введение

Современное машиностроение широко использует конструкционные алюминиевые сплавы, такие как AMg6, B95 и т.п., однако структура коммерческих полуфабрикатов из этих сплавов далека от оптимальной, что влечёт за собой снижение комплекса механических свойств готовых изделий, изготовленных из этих полуфабрикатов. Традиционные виды термической обработки не всегда позволяют достичь исправления структуры и получения высокого комплекса эксплуатационных свойств. Наиболее часто встречающимися дефектами структуры коммерческих полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, содержащих

магний и цинк, является полосчатость, образованная упрочняющей интерметаллидной фазой MgZn<sub>2</sub>. В настоящей работе методами оптической микроскопии высокого разрешения исследована структура магниевых алюминиевых сплавов при различных режимах термической обработки, заключающейся в длительном гомогенизационном отжиге.

### Методика

Исследования проводили на образцах из сплавов AMg6 и B95 с размерами 15x15x4 мм. Для термообработки использовали камерную печь типа СНОЛ, оборудованную ПИД-регулятором «Термодат 14–Е5», образцы за-

гружали в предварительно разогретую до температуры 500 °С печь и выдерживали в ней в течение 8 и 16 ч. По завершении выдержки, образцы извлекали из печи и охлаждали на спокойном воздухе. Измерение твердости производили на исходных образцах и образцах после термообработки на полуавтоматическом микротвердомере МН-6 при нагрузке на индентор 100 г. Измерение твердости производили на образцах до термообработки, непосредственно после термообработки и спустя 14 суток после термообработки. Металлографические исследования проводили при помощи программно-аппаратного комплекса «Тиксомет ПРО», имеющего в своем составе оптический микроскоп Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Для металлографических исследований образцы заливали в эпоксидный компаунд, после чего производили шлифовку и полировку на автоматическом шлифовально-полировальном станке «DIGIPREP». Травление приготовленных шлифов осуществляли в реактиве Кролла (смесь 4 % водных растворов плавиковой и азотной кислот в соотношении 50:50 %). При металлографических исследованиях изучали микроструктуру, размеры, форму и характер распределения интерметаллидных фаз в алюминиевых сплавах [1-8].

### Результаты и обсуждение

Растворимость магния в твердом алюминии меняется от ~17 масс. % при 500 °С до 1,59 масс. % при 10 °С [1]. По мере охлаждения сплава с температуры 500 °С, магний частично остается в твердом растворе, образуя пересыщенный твердый раствор и частично выделяется в виде интерметаллидных фаз типа  $Al_3Mg_2$ ,  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $Mg_3Al_4$  и др. Растворение магния в алюминии вызывает увеличение параметра решетки алюминия, причем каждый процент магния увеличивает параметр решетки на 0,0052 Å.

В сплавах системы Al – Mg – Zn магний с цинком образует двойные и тройные интерметаллидные фазы типа  $MgZn_2$ ,  $(Al_2Mg_3Zn)$ , обеспечивающие высокие прочностные свойства этих сплавов при старении [9-11].

Сплавы, содержащие до 7 масс. % Mg, дают незначительное упрочнение при термообра-

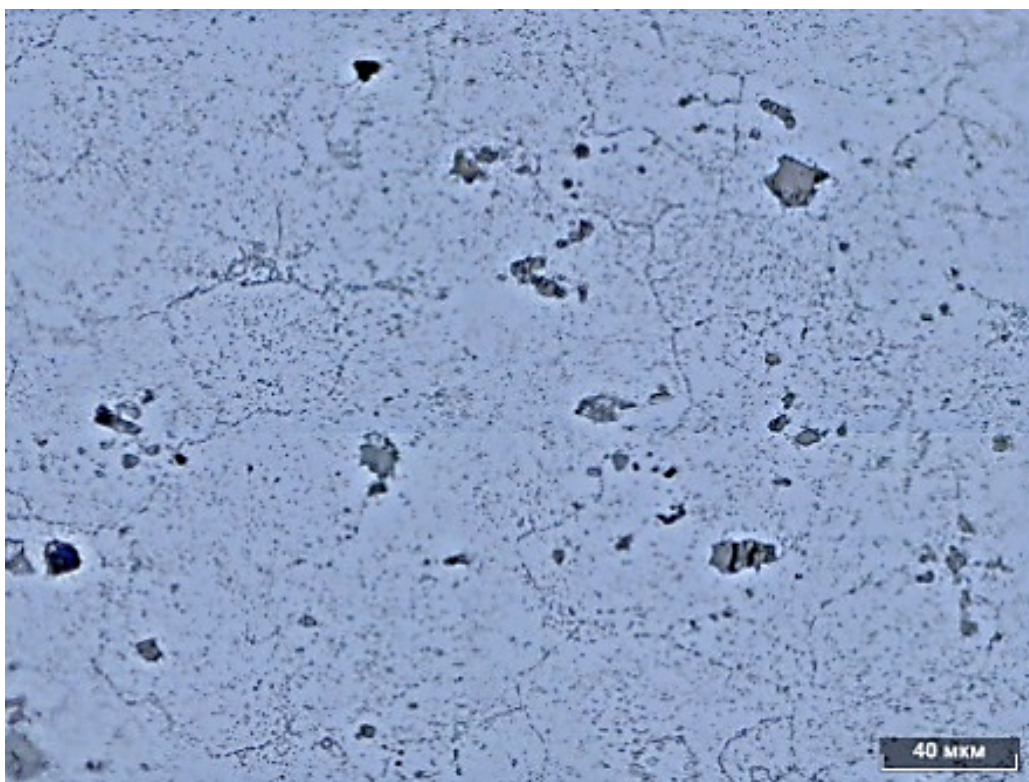
ботке. Вследствие этого сплавы АМг упрочняют с помощью пластической деформации и используют в нагартованном (АМгН – 80% наклепа) и полунагартованном (АМгП – 40% наклепа) состояниях.

Повышение содержания магния в сплавах АМг приводит к увеличению количества интерметаллидных фаз, преимущественно фазы  $Al_3Mg_2$ . При этом временное сопротивление сплавов АМг повышается от 110 МПа (АМг1) до 430 МПа (АМг6) при соответствующем снижении относительного удлинения с 28 до 16 %. Легирование магнием, кроме того, вызывает склонность к окислению во время плавки, разливки и кристаллизации, что, в свою очередь, приводит к появлению оксидных пленок и включений и, соответственно, снижению механических свойств.

Высокопрочные алюминиевые сплавы типа В95 отличаются высоким временным сопротивлением (600-700 МПа) и периодом текучести. Высокопрочные сплавы принадлежат к системе Al – Zn – Mg – Cu. Цинк и медь, увеличивая неустойчивость твердого раствора, ускоряют его распад, усиливая эффект старения сплава. Цинк, магний и медь образуют фазы, обладающие переменной растворимостью в алюминии:  $M(MgZn_2)$ ,  $S(CuMgAl_2)$ ,  $T(Mg_3Zn_3Al_2)$ . При температуре 480 °С и выше, эти фазы переходят в твердый раствор, который может быть зафиксирован закалкой с образованием пересыщенного твердого раствора. При старении происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием тонкодисперсных частиц метастабильных M, T и S фаз, вызывающих упрочнение сплавов типа В95 [9-15].

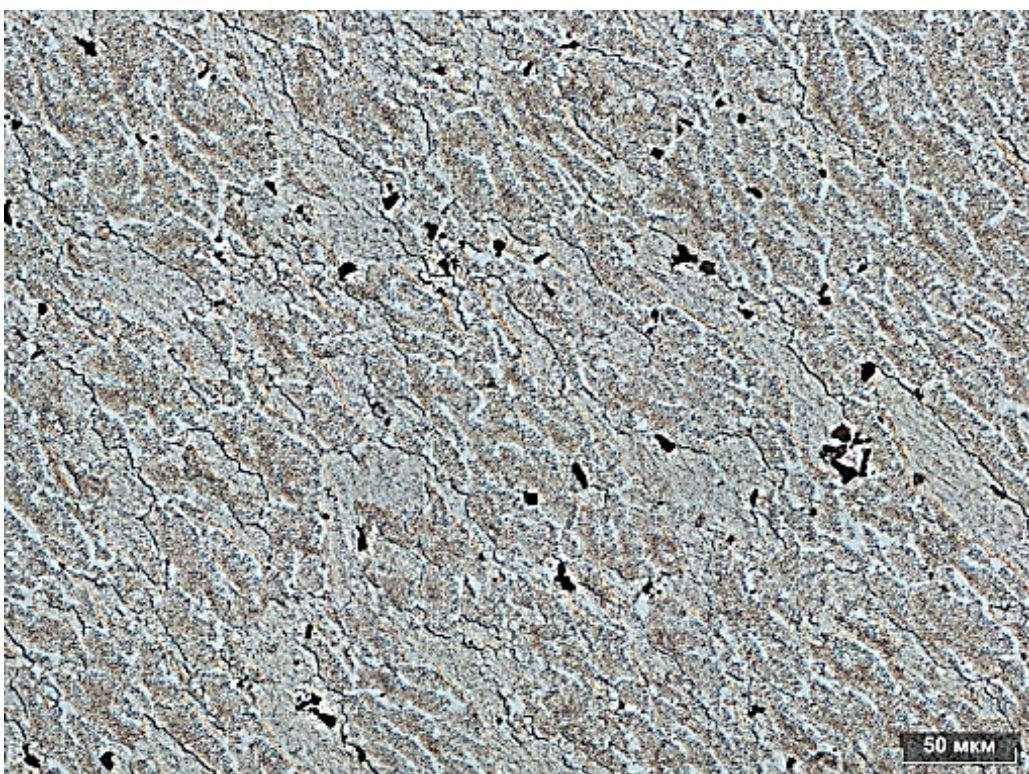
Микроструктуры сплавов АМг6 и В95 в состоянии поставки, представлены на рис.1 и рис.2. Микроструктуры образцов сплава АМг6 после 8 и 16 ч. отжига и естественного старения в течение 14 суток представлены на рис.3 и рис.4 соответственно. Аналогично на рис.5 и рис.6 представлены фотографии микроструктур сплава В95 после отжига при 500 °С в течение соответственно 8 и 16 ч. и естественного старения в течение 14 суток.





**Рис.1.** Микроструктура сплава АМг6 в состоянии поставки

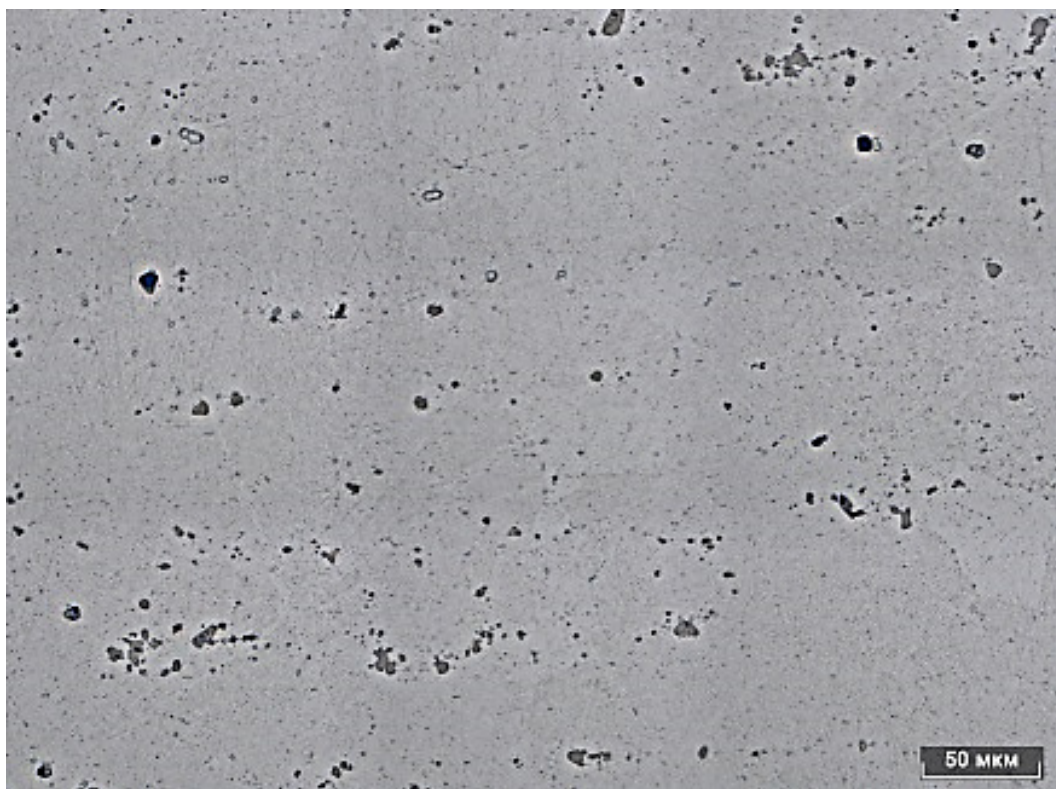
**Fig.1.** Microstructure of AMg6 alloy as delivered



**Рис.2.** Микроструктура сплава В95 в состоянии поставки

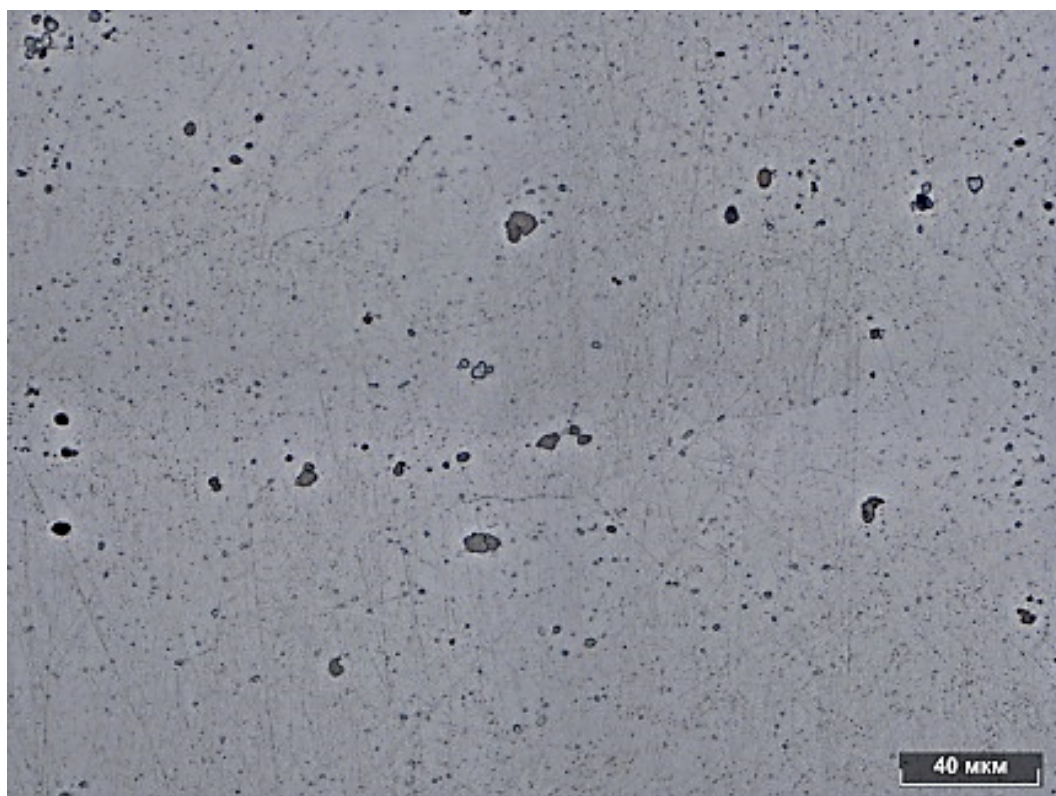
**Fig.2.** Microstructure of V95 alloy as delivered





**Рис.3.** Микроструктура сплава АМг6 после 8 ч. отжига при 500 °С

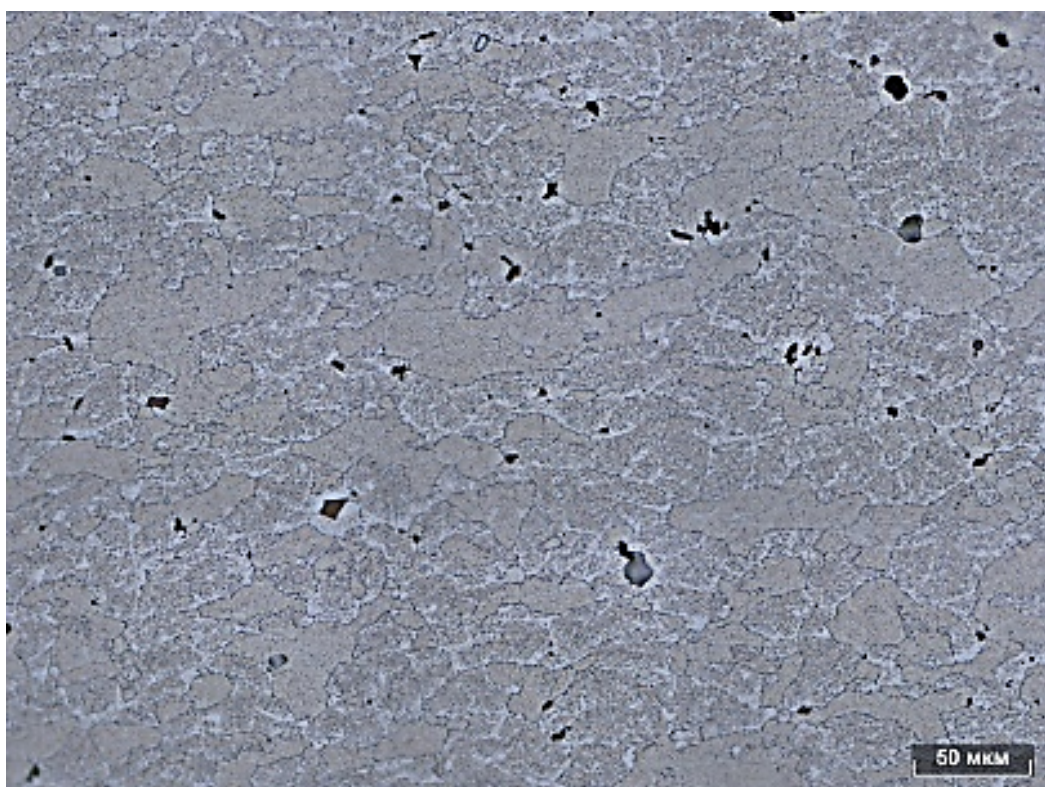
**Fig.3.** Microstructure of the AMg6 alloy after 8 h. of annealing at 500 °С



**Рис.4.** Микроструктура АМг6 после 16 ч. отжига при 500 °С

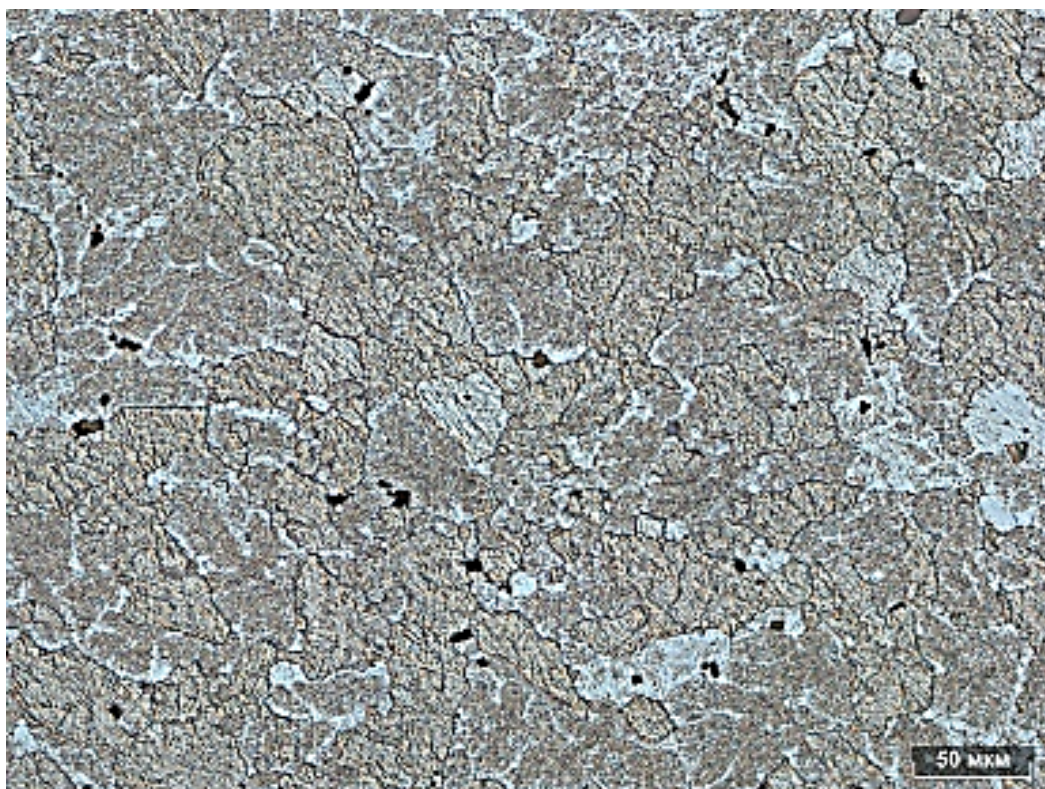
**Fig.4.** Microstructure of AMg6 after 16 h. of annealing at 500 °С





**Рис.5.** Микроструктура сплава В95 после 8 ч. отжига при 500 °С

**Fig.5.** Microstructure of V95 alloy after 8 h. of annealing at 500 °С



**Рис.6.** Микроструктура В95 после 16 ч. отжига при 500 °С

**Fig.6.** Microstructure of V95 after 16 h. of annealing at 500 °С

Анализируя рис.1-6, можно отметить, что увеличение времени высокотемпературной выдержки при 500 °С для обоих сплавов, приводит к растворению интерметаллидных частиц, о чем свидетельствует уменьшение их размеров. При этом в результате происходящих структурно-фазовых превращений при дальнейшем

охлаждении и последующем естественном старении, интерметаллидная фаза вновь выделяется из твердого раствора. Измерения твердости, произведенные на исходных образцах, затем после высокотемпературного отжига и в последующем – после естественного старения в течение 14 суток представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты определения твердости сплавов В95 и АМг6, термообработанных по различным режимам

**Table 1.** Results of determining the hardness of V95 and AMg6 alloys heat-treated in different modes

Марка сплава	Твердость, HV <sub>0,1</sub>				
	Исходные	Отжиг 8 ч.		Отжиг 16 ч.	
		Без старения	Старение 14 сут	Без старения	Старение 14 сут.
АМг6	97,5	84,7	96,9	75,5	82,9
В95	199,5	110,4	145,5	102,3	149,1

### Выводы

Анализируя данные микроструктурных исследований и результаты определения твердости, приведенные в таблице 1, можно прийти к следующим выводам:

1. Увеличение продолжительности высокотемпературной выдержки при отжиге закономерно приводит к увеличению степени растворения интерметаллидных частиц и их переходу в твердый раствор, о чем свидетельствует снижение показателей твердости, измеренной непосредственно после термообработки.

2. Снижение твердости после термообработки происходит как на сплавах системы Al-Mg, так и на сплавах системы Al-Mg-Zn-Cu, при этом относительная величина снижения в большей степени коррелирует с временем высокотемпературной выдержки.

Высокотемпературный отжиг алюминиевых сплавов АМг6 и В95 приводит к растворению интерметаллидных включений, а последующее старение приводит к увеличению числа выделений интерметаллидной фазы наряду с уменьшением их размеров.

### Список литературы

1. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Гурьев А.М., Романенко В.В. Фазовый анализ боридных комплексных диффузионных слоев на углеродистых сталях при помощи цветного травления // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2020. Т. 17, № 1. С. 74–77.

2. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V., Lyubochko D.A., Chigintsev L.S. Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis // *Microsc. Microanal.* 2015. V. 21. P. 1755–1756.

3. Vander Voort G.F., Pakhomova O., Kazakov A. Evaluation of normal versus non-normal grain size distributions // *Mater. Perform. Character.* 2016. V. 5. P. 521–534.

4. ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures. 2004. P. 493–512.

5. Kazakov A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure // *Metallogr. Microstruct. Anal.* 2016. V. 5. P. 294–301.

6. Vander Voort G.F. Computer-aided microstructural analysis of specialty steels // *Materials characterization*. 1991. V. 27, N 4. P. 241–260.

7. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I. Methodological features of micro-structural heterogeneity estimation by the thickness of steel plates // *Chernye Metally*. 2021. N 7. P. 65–75.

8. Kazakov A., Kovalev P., Ryaboshuk S. Metallurgical expertise as the base for determination of nature of defects in metal products // *CIS Iron Steel Rev.* 2007. V. 1–2. P. 7.

9. Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов. Справочное руководство. Изд-во «Металлургия», 1971. 352 с.

10. Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др. *Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений / под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 384 с.*



11. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. 2-е изд. Изд-во «Металлургия», 1970. 364 с.

12. Буделовский Д.И., Петрович С.Ю., Липин В.А., Боричева И.К., Андреева В.Д., Шахмин А.Л. Особенности микроструктуры быстроохлажденных чешуек из сплавов системы Al-Mg-Zr-X // Технология легких сплавов. 2016. № 3. С. 53–57.

13. Калиниченко А.С., Калиниченко В.А., Нисс В.С., Григорьев С.В. Стабильность микроструктуры быстрозакаленных алюминиевых сплавов // Литьё и металлургия. 2014. Т. 74, № 1. С. 93–96.

14. Осинцев О.Е., Конкевич В.Ю. Высокопрочные быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu // Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 157–163.

15. Цукров С.Л. Параметры отжига рулонов из алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 2016. № 1. С. 68–73.

#### Информация об авторах

М. Н. Зенин – инженер Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, профессор Уханьского текстильного университета.

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, заведующий лабораторией микроскопии Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Е. В. Черных – кандидат физико-математических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

#### References

1. Ivanov, S. G., Guryev, M. A., Guryev, A. M. & Romanenko, V. V. (2020). Phase analysis of boride complex diffusion layers on carbon steels using color etching. *Fundamental'nye problemy*

*sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(1), 74–77. (In Russ.).

2. Kazakov, A. A., Ryaboshuk, S. V., Lyubochko, D. A. & Chigintsev, L. S. (2015). Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis. *Microsc. Microanal.*, 21, 1755–1756.

3. Vander Voort, G. F., Pakhomova, O. & Kazakov, A. (2016). Evaluation of normal versus non-normal grain size distributions. *Mater. Perform. Character.*, 5, 521–534.

4. (2004). ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures. P. 493–512.

5. Kazakov, A. & Kiselev, D. (2016). Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure. *Metallogr. Microstruct. Anal.*, 5, 294–301.

6. Vander Voort, G. (1991). Computer-aided microstructural analysis of specialty steels. *Materials characterization*, 4(27), 241–260.

7. Kazakov, A. A., Kiselev, D. V. & Kazakova, E. I. (2021). Methodological features of micro-structural heterogeneity estimation by the thickness of steel plates. *Chernye Metally*, (7), 65–75.

8. Kazakov, A., Kovalev, P. & Ryaboshuk, S. (2007). Metallurgical expertise as the base for determination of nature of defects in metal products. *CIS Iron Steel Rev.*, (1-2), 7.

9. (1971). Aluminum alloys. Metal science of aluminum and its alloys. Spravochnoye rukovodstvo. Izd-vo «Metallurgiya». P. 352. (In Russ.).

10. Arzamasov, B. N., Sidorin, I. I. & Kosolapov, G. F. et al. (1986). Materials science: a textbook for higher technical educational institutions / pod obshch. red. B. N. Arzamasova. 2-ye izd., ispr. i dop. M.: Mashinostroyeniye. P. 384.

11. Maltsev, M. V. (1970). Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys. 2-ye izd. Izd-vo «Metallurgiya». P. 364.

12. Budelovsky, D. I., Petrovich, S. Yu., Lipin, V. A., Boricheva, I. K., Andreeva, V. D. & Shakhmin, A. L. (2016). Features of the microstructure of rapidly cooled flakes from alloys of the Al-Mg-Zr-X system. *Tekhnologiya legkikh spлавov*, 3, 53–57. (In Russ.).

13. Kalinichenko, A. S., Kalinichenko, V. A., Niss, V. S. & Grigoriev, S. V. (2014). Stability of the microstructure of rapidly hardened aluminum



alloys. *Lit'yo i metallurgiya*, 74(1), 93–96. (In Russ.).

14. Osintsev, O. E. & Konkevich, V. Yu. (2010). High-strength rapidly crystallized aluminum alloys of Al-Zn-Mg and Al-Zn-Mg-Cu systems. *Tekhnologiya legkikh splavov*, (1), 157–163. (In Russ.).

15. Tsukrov, S. L. (2016). Annealing parameters for aluminum alloy coils. *Tekhnologiya legkikh splavov*, (1), 68–73. (In Russ.).

#### **Information about the authors**

*M. N. Zenin – Engineer, I.I. Polzunov Altai State Technical University.*

*A. M. Guryev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department, I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University.*

*S. G. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Assistant Professor, Head of the Laboratory of Microscopy, I.I. Polzunov Altai State Technical University.*

*M. A. Guryev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.*

*E. V. Chernykh – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.02.2022; одобрена после рецензирования 21.02.2022; принята к публикации 28.02.2022.

The article was received by the editorial board on 14 Feb. 22; approved after reviewing 21 Feb. 22; accepted for publication 28 Feb. 22.