

*Рубан Ирина Николаевна, аспирант кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники» ФГБОУ ВО «АГТУ», e-mail: irinaruban1979@mail.ru*

*Булгаков Владимир Павлович, профессор кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники» ФГБОУ ВО «АГТУ», e-mail: mbulgak@mail.ru*

*Укусов Сергей Семенович, старший преподаватель кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ») 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16*

## **СТАБИЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И РАЗМЕРОВ ПОРШНЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ИЗ СПЛАВА ALSI12CU2MGN1 (AL25)**

*Ключевые слова: химическая неоднородность, отливка, ликвация, сплав, тепловой зазор, коэффициент термического расширения, теплопроводность, диаграмма равновесия, твердый раствор, закалка, отпуск, отжиг, механические свойства, стабилизация размеров и свойств.*

*Аннотация. Цель работы: технология стабилизации механических свойств и размеров поршня из сплава AL25 за счет снижения влияния химической неоднородности в отливке и получение равновесной структуры металла в температурном диапазоне работы поршня. При кристаллизации эвтектического сплава AL25 возникает ликвация в заготовке по направлению от головки к юбке поршня, а в диаметральной плоскости – от наружной поверхности к оси поршня. Ликвация изменяет физические и механические свойства отливки, такие как: коэффициенты объемного и линейного расширения, плотность, что в конечном итоге приведет к изменению теплового зазора между втулкой цилиндра и поршнем, обусловленным режимом работой двигателя внутреннего сгорания. Снижение влияния химической неоднородности на однородность свойств как заготовки, так и самого поршня возможно за счет уменьшения перегрева сплава выше линии ликвидус и выдержки жидкого металла на стенде перед разливкой, что позволит получить равновесную структуру сплава. Последующая термическая обработка, рекомендованная технологическим процессом изготовления поршней среднеоборотных двигателей внутреннего сгорания, позволяет стабилизировать линейные размеры и свойства поршня, но не устраняет эффект от химической неоднородности. Закалка от температуры близкой к температуре плавления снизила химическую неоднородность и сделала насыщенным легирующими элементами твердый раствор алюминия, стойким к циклическим перегревам. Отпуск завершил процесс старения – выделение второй фазы, стабилизировал твердость и пластичность металла. Отжиг окончательно ликвидировал следы старения, коагулировал и увеличил зерно сплава. В результате стабилизированы механические свойства – повышена прочность и пластичность при температуре до 300 °С. Стабилизирован коэффициент линейного расширения, ликвидировано необратимое изменение размеров поршня в диапазоне рабочих температур двигателя.*

Поршни среднеоборотных дизелей производят из алюминиевых сплавов и чугунов. Чугунные поршни двигателей внутреннего сгорания (ДВС) обладают рядом недостатков, к которым можно отнести их большую массу, к достоинствам, то, что металл поршней однороден металлу поршневых колец, а также структура содержит включения графита. Достоинство поршней из сплавов алюминия проявляется в их малом весе по сравнению с чугунными, плотность составляет 2700 кг/м<sup>3</sup>; высокая теплопроводность, что снижает рабочую температуру поршня. К недостаткам сплавов на основе алюминия относят сравнительно невысокие механические свойства, которые изменяются в худшую сторону при нагреве, низкая износостойкость; высокий коэффициент линейного расширения вынуждает увеличивать тепловой зазор между поршнем и втулкой. Это вызывает вибрацию, способствующую ускоренному кавитационному износу втулок. После сборки двигателя поршни увеличиваются в размерах спустя несколько часов работы. Возможны задиры деталей цилиндропоршневой группы [1, 2].

Сложнолегируемый поршневой алюминиевый сплав AL25 относится к эвтектическим силуминам. Сплав легирован компонентами: 11...13% кремния, 1,5...3% меди, 0,8...1,3% магния, 0,8...1,3% никеля, 0,3...0,6% марганца, 0,05...0,2% титана, до 0,8% железа. Эти компоненты сплава имеют высокую плотностью и температуру плавления. При температуре около 700 °С и выше сплав находится в жидком виде. Температура 700 °С является температурой литья сплава AL25. При кристаллизации и последующем охлаждении алюминиевого сплава в крупной отливке возникает ликвация (химическая неоднородность), которая вызывает анизотропию физических и механических свойств. Структура литого металла формируется по системе «алюминий-кремний», состоит из насыщенного переходными металлами твердого раствора алюминия, зерна которого окружены ликвационной фазой из этих элементов, и кремния (рис. 1) [3, 4].

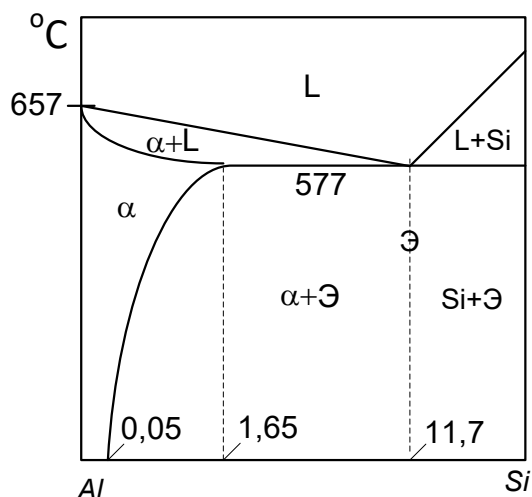


Рис. 1. Диаграмма равновесного состояния системы «алюминий-кремний»

При заливке металла в кокиль на его холодных стенках сперва кристаллизуются элементы с высокой температурой плавления – медь, марганец, железо, никель, титан. Кристаллы тяжелых металлов оседают, и их концентрация увеличивается в головке поршня. Отрицательная ликвация тяжелых металлов и положительная ликвация магния в юбке понизила плотность поршня до 2690 кг/м<sup>3</sup> и твердость до 80 НВ. Плотность головки увеличена до 2780 кг/м<sup>3</sup>, твердость составляет 95 НВ. Таким образом, анизотропия металла поршня сместила его центр тяжести, и проявилась в асимметрии механических свойств от боковых поверхностей к оси поршня в горизонтальном и от головки поршня к юбке в вертикальном направлениях. После затвердевания отливки структура металла далека от равновесной, избыточная фаза в результате ликвации не обеспечила необходимые стабильные свойства: прочность, пластичность и размеры поршня.

Эвтектический сплав АЛ25 при охлаждении в твердом состоянии имеет ограниченную растворимость легирующих элементов. Получить необходимые механические свойства возможно только изменением структуры отливки: насыщением твердого раствора до предела растворимости, коагуляцией второй фазы и укрупнением зерна. Термическая обработка такого сплава должна предусмотреть получение пересыщенного твердого раствора и сохранение структуры при всех температурных режимах работы поршня. Для обеспечения стабильности размеров поршней, а также их механических свойств, требуется определенная термическая обработка, причем в различных сочетаниях: отжиг, закалка и отпуск [5].

Упрочнение силуминов при термической обработке производят закалкой от температуры 535...540 °С и старением при температуре 150...180 °С. Но поршень работает при температуре выше температуры старения и поэтому упрочняющая термообработка бесполезна и даже вредна, так как при работе двигателя происходит достаривание такого сплава и изменение размеров поршня [6]. Цель стабилизационной технологии состоит в том, что литому металлу поршня необходимо обеспечить постоянную структуру в интервале рабочих температур заданного ресурса двигателя. В связи с этим легированный сплав необходимо закалить так, чтобы твердый раствор сохранил свойства при температуре до 300 °С. Температура закалки должна быть на 20 °С ниже эвтектической т.е. 550±5 °С. Охлаждение производится в горячей воде 90...100 °С во избежание изменения размера поршня после механической обработки. Механические свойства отдельно отлитых образцов из сплава АЛ25 после закалки и отпуска приведены в табл.1.

Таблица 1

**Влияние термической обработки на механические свойства  
отдельно отлитых образцов из сплава АЛ25**

№ п/п	Вид термообработки	Твердость, НВ	Прочность, МПа	Пластичность, %	Размеры зерна, балл
1	В состоянии литья без ТО	82	160	0,8...1,2	4...5
2	Закалка 550°С в воде при 90...100°С, отпуск 150°С	110	230	1,8...2,1	3...4
3	Закалка 550°С в воде при 90...100°С, отпуск 200°С	105	210	2,3...2,7	3...4
4	Закалка 550°С в воде при 90...100°С, отпуск 250°С	88	190	6...8	1...2

Для получения достаточной прочности и высокой стабильности структуры и размеров закаленный металл подвергают отпуску при температуре, превышающей температуру старения сплава, близкую к рабочей температуре поршня. Если старение произведено не до конца или в металле наблюдается значительная ликвация, то поршни увеличиваются в размерах после нескольких часов работы двигателя (происходит достаревание металла). Чтобы устранить это явление поршень подвергают отпуску в течение двух-трех часов при температуре 240...250 °С [7].

На рис. 2 приведены изменения твердости и пластичности закаленного сплава АЛ25 в зависимости от температуры отпуска. Наибольшее упрочнение (твердость 110...95НВ) закаленного сплава достигается при температуре старения 150...200 °С.

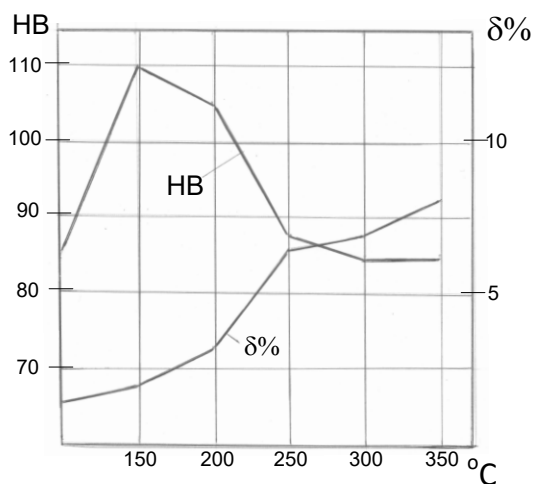


Рис. 2. Твердость и пластичность закаленного сплава АЛ 25 в зависимости от температуры отпуска

Перестаривание наступает при температуре 250 °С (твердость 85НВ). Одновременно происходит повышение пластичности от 0,8 до 7%, что связано с окончанием процесса старения – образованием новой фазы и коагуляцией зерен твердого раствора. Температурная зависимость твердости и пластичности стабилизированного сплава АЛ25 приведена в табл. 2 [8].

Таблица 2

Зависимость твердости и пластичности стабилизированного сплава АЛ25 от температуры

Температура, °С	20	100	150	200	250	300	350	400
Твердость, НВ	110	95	80	65	50	45	25	15
Пластичность, %	8	9	10	11	12	13,8	14,2	15,6

После завершения распада твердого раствора, когда концентрация компонентов сплава АЛ25 будет равновесной, наступает стабилизация линейных размеров поршня [9, 10], что обеспечивается постоянством коэффициента линейного расширения металла при рабочих температурах деталей цилиндропоршневой группы дизеля [11]. В сплаве на коэффициент оказывают влияние все компоненты, но в большей степени кремний. У кремния коэффициент линейного расширения в 6 раз меньше, чем у металла основы – алюминия [12, 13].

Одной из задач исследования было изучение влияния нагрева материала поршня и непосредственно поршня на изменение его линейных размеров. Это влияние изучалось на образцах цилиндрической формы и на натурном поршне, причем отливки поршня и образцов перед исследованием подвергались предварительной черновой обработке (обдирке), а также последующей термической обработке.

Образцы и поршень были получены литьем, причем при получении отливки поршня использовалось литье в кокиль, при получении образцов правильной формы – литье в песчаные формы.

После обдирки образцы и поршень помещали в нагретую до определенной температуры печь с контролем температуры контактным способом, после чего их извлекали из печи и определяли диаметр микрометрической скобой в трех поясах. Измерения проводили в нагретом состоянии, после чего были рассчитаны коэффициенты линейного расширения. Попутно был определен прирост диаметров при 350°С в различных зонах поршня. Измерения диаметров поршня в разных поясах при разных температурах с шагом 50 °С позволил построить зависимости диаметра от температуры, которые также представлены в табл. 3 [2].

Таблица 3

**Результаты измерений характеристик алюминиевого поршня  
в интервале температур от 20 °С до 450 °С**

Пояс в районе	Прирост диаметра при температуре около 350 °С	Коэффициент линейного расширения, мм/°С	Зависимость диаметра поршня от температуры
Юбки поршня	2,7...2,8 мм	$(22,5...23,5) \cdot 10^{-6}$	$D = 0,0079 \cdot T + 342$
Тронка поршня	2,4...2,5 мм	$(21,5...22,5) \cdot 10^{-6}$	$D = 0,0076 \cdot T + 340$
Головки поршня	1,5...1,6 мм	$(15,2...15,4) \cdot 10^{-6}$	$D = 0,0074 \cdot T + 339$

Для получения качественных отливок с мелкозернистой структурой и минимально возможной ликвацией в объеме поршня необходимо выполнить два условия: не перегревать сплав более чем на 10 °С над линией ликвидус и не передерживать металл на стенде перед разливкой более 10 минут. Тогда твердые микрочастицы кремния обеспечивают мелкокристаллическую структуру, а зональная ликвация тяжелых и более тугоплавких легирующих элементов не успеет произойти [14, 15].

Термическая обработка полностью не устраняет эффект от ликвации, но позволяет улучшить механические свойства металла и стабилизировать размеры поршня при циклических перегревах. Стабилизирующая термическая обработка включает:

1. Закалку – ступенчатый нагрев литой заготовки до температуры ниже ликвидус на 20 °С. Выдержка 10 часов и охлаждение в горячей воде (90...100 °С). Закалка выравнивает ликвацию по объему поршня и образует насыщенный твердый раствор алюминия, близкий к равновесному и снижает количество дефектов на границе зерен.

2. Отпуск производится при температуре выше конца старения, когда стабилизируется твердость и пластичность металла.

3. Пятикратный отжиг при температуре 250<sup>0</sup>С для гарантированной стабилизации размеров поршня.

Представленные мероприятия по снижению химической неоднородности и технология термической обработки поршня из сплава АЛ25 позволили стабилизировать структуру металла – механические свойства и устранить необратимую деформацию поршня на всех режимах работы двигателя.

Вредное влияние химической неоднородности в пределах поршня возможно улучшением равномерности микроструктуры за счет снижения перегрева над линией ликвидус и уменьшением выдержки металла на стенде перед разливкой. Термическая обработка полностью не устраняет последствия от ликвации, но стабилизирует механические свойства и размеры поршня. Закалка от температуры близкой к температуре плавления снизила химическую неоднородность и сделала насыщенным легирующими элементами твердый раствор алюминия, стойким к циклическим перегревам. Отпуск завершил процесс старения – выделение второй фазы, стабилизировал твердость и пластичность металла. Отжиг окончательно ликвидировал следы старения, коагулировал и увеличил зерно сплава. В результате стабилизированы механические свойства – повышена прочность и пластичность при температуре до 300 °С. Стабилизирован коэффициент линейного расширения, ликвидировано необратимое изменение размеров поршня в диапазоне рабочих температур двигателя.

**Список литературы:**

- [1] Вознесенский И.В. Судовые дизели и их эксплуатация. Учеб. Для мореход. Училищ. 2-е изд./ И.М. Вознесенский, Е.Г.Михеев. -М.:Транспорт, 1990.-360с.
- [2] Булгаков В.П. Влияние химической неоднородности неоднородности отливки поршня из сплава АК12М2МгН (АЛ25) на задиорообразование в цилиндропоршневой группе./ В.П. Булгаков, Ю.В. Чеботарев, И.Н. Рубан// Вестник ГУМРФ им.адмирала С.О. Макарова. – 2016, вып 5(39),-с. 151–157.
- [3] Ершов Г.С. Высокопрочные алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья / Г.С Ершов., Ю.Б. Бочков. -М.: Металлургия, 1979. – 180 с.
- [4] Бернштейн М.Л. Материаловедение и термическая обработка стали / М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштад, -М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
- [5] Зильберг Ю.Я. Алюминиевые сплавы в тракторостроении /Ю.Я. Зильберг, К.М.Хрущева. Г.Б. Генршмен . - М.:Машиностроение, 1972. –313 с.
- [6] Возницкий И.В., Михеев Е.Г. Судовые дизели и их эксплуатация. Учеб. для мореходных училищ. 2-е изд. перераб. И доп. – М.: Транспорт, 1990. – 361 с.
- [7] Койдан И.М. Современные технологии изготовления заготовок поршней для форсированного дизельного двигателя из поршневых алюминиевых сплавов методами тиксоформования/ И.М. Койдан, А.С. Журавлев// Литье и металлургия.- 2013-№3s(72).-с.42–45.
- [8] Орлов Н.Д. Справочник литейщика. Фасонное литье из сплавов цветных металлов / Н.Д. Орлов, В.М. Чурсин.-М.: Машиностроение, 1971.-450 с.
- [9] Евстафеев В.В. Совершенствование технологии изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания/ В.В. Евстафеев, А.А. Александров, А.А. Исков// Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки: материалы Международной научно практической конференции. – Омск. СибАДИ, 2014. - с. 240–242.
- [10] Насыров Р.А. Повышение надежности работы поршней тепловозных дизелей/ Р.А. Насыров.-М.: Транспорт, 1977. - 256 с.

- [11] Карпов Л.Н. Неоднородность и качество судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1975. – 232 с.
- [12] Кузьмин Н.П. Ликвация и повышение качества проб литейных алюминиевых сплавов / М.П. Кузьмин, М.Ю. Кузьмина//Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013 - №12 (83). - с. 210–213.
- [13] Кондратьев Н.Н. Отказы и дефекты судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1985. – 152 с.
- [14] Погодаев Л.И., Шеченко П.А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1984. – 263 с.
- [15] Строганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием/Г.Б. Строганов, В.А. Роттенберг, Г.Б. Гершман.// Сплавы алюминия к кремнием, М.; Металлургия, 1979. – 185 с.
- UDC 669.725.018.298:621.43-242

## STABILIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND DIMENSIONS OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE PISTON MADE OF ALSI12CU2MGNI (AL25) ALLOY

*Ruban Irina N., the postgraduate student of Department of Shipbuilding  
and Power Complexes of Marine Engineering*

*Astrakhan State Technical University,*

*Bulgakov Vladimir P., professor of Department of Shipbuilding and Power  
Complexes of Marine Engineering Astrakhan State Technical University,*

*Uksusov Sergey S., senior lecturer of Department of Shipbuilding and  
Power Complexes of Marine Engineering*

*Astrakhan State Technical University*

*16, Tatischev st, Astrakhan, 414056*

*Keywords: chemical heterogeneity, casting, segregation, alloy, heat gap, thermal expansion coefficient, heat conductivity, equilibrium diagram, solid solution, quenching, tempering, annealing, mechanical properties, dimensions and properties stabilization.*

*Annotation. The objective of the paper: the technology of stabilization of mechanical properties and dimensions of the piston made of AL25 alloy by reducing the influence of chemical heterogeneity in the casting and obtaining an equilibrium metal structure in the piston operating temperature range. When the complex alloyed alloy AL25 solidifies, in the casting the chemical heterogeneity occurs in the direction of the piston axis from the top to the bottom, in the radial direction from the outer surface to the center, when moving around a circle in a horizontal section. Segregation results in the change of metal's mechanical and physical properties: density, thermal expansion coefficient, heat conductivity; causes different amounts of the heat gap between the piston and the sleeve from the head to the skirt. The segregation harmful effect on properties uniformity within the piston is possible by increasing the structure uniformity through reducing overheating over the liquidus line and reducing the metal exposure on the stand before casting. Heat treatment does not completely eliminate the segregation effect, but stabilizes piston's mechanical properties and dimensions. Hardening at the temperature close to the melting temperature has reduced the chemical heterogeneity and made solid solution of aluminum alloys saturated with alloying elements resistant to cyclic overheating. Tempering has completed the aging process - the allocation of the second phase, has stabilized metal's hardness and ductility. Annealing has eliminated the signs of aging completely, has coagulated and increased the grain size of the alloy. As a result, the mechanical properties have been stabilized; strength and ductility have been increased at temperatures up to 300<sup>0</sup>C. The linear expansion coefficient has been stabilized; the irreversible change of the piston dimensions in the range of the engine operating temperatures has been eliminated.*

### References:

- [1] Voznesenskij I.V. Sudovye dizeli i ih ekspluatatsiya. Ucheb. Dlya morekhod. Uchilishch. 2-e izd./ I.M. Voznesenskij, E.G.Miheev. -M.:Transport, 1990.-360s.
- [2] Bulgakov V.P. Vliyaniye himicheskoy neodnorodnosti otlivki porshnya iz splava AK12M2MgN (AL25) na zadiroobrazovanie v cilindroporshnevoj gruppe./ V.P. Bulgakov, YU.V. CHEbotarev, I.N. Ruban// Vestnik GUMRF im.admirala S.O. Makarova.-2016, vyp 5(39),-s.151-157.
- [3] Ershov G.S. Vysokoprochnyye alyuminievye splavy na osnove vtorichnogo syr'ya/ G.S Ershov., YU.B. Bochkov. -M.: Metallurgiya, 1979.-180s.
- [4] Bernshteyn M.L.Materialovedenie i termicheskaya obrabotka stali. / M.L. Bernshteyn, A.G.Rahshtad, -M.: Metallurgiya, 1983.-352s.
- [5] Zil'berg YU.YA. Alyuminievye splavy v traktorostroenii /YU.YA. Zil'berg, K.M.Hrushcheva. G.B. Genrshmen . - M.:Mashinostroenie, 1972.-313 s.
- [6] Voznickij I.V., Miheev E.G. Sudovye dizeli i ih ekspluatatsiya. Ucheb. dlya morekhodnyh uchilishch. 2-e izd. pererab. I dop. – M.: Transport, 1990. – 361 s.
- [7] Kojdan I.M. Sovremennyye tekhnologii izgotovleniya zagotovok porshnej dlya forsirovannogo dizel'nogo dvigatelya iz porshnevyyh alyuminievyh splavov metodami tiksoformovaniya/ I.M. Kojdan, A.S. ZHurvayev// Lit'e i metallurgiya.-2013-№3s(72).-s.42-45.
- [8] Orlov N.D. Spravochnik liteyshchika. Fasonnoe lit'e iz splavov cvetnyh metallov/N.D. Orlov, V.M. CHursin.-M.: Mashinostroenie, 1971.-450 s.

- [9] Evstafeev V.V. Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya porshnej dvigatelej vnutrennego sgoreniya/ V.V. Evstafeev, A.A. Aleksandrov, A.A. Iskov// Razvitie dorozhno-transportnog i stroitel'-nogo kompleksov i osvoenie strategicheskoi vazhnykh territorij Sibiri i Arktiki: vklad nauki: materialy Mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoi konferencii.- Omsk.SibADI, 2014.-s.240-242.
- [10] Nasyrov R.A. Povyshenie nadezhnosti raboty porshnej teplovoznih dizelej/ R.A. Nasyrov.-M.: Transport, 1977.-256s.
- [11] Karpov L.N. Neodnorodnost' i kachestvo sudovykh dizelej. – L.: Sudostroenie, 1975. – 232 s.
- [12] Kuz'min N.P. Likvaciya i povyshenie kachestva prob litejnykh alyuminiyevykh splavov / M.P. Kuz'min, M.YU. Kuz'mina//Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.-2013-№12 (83).-s.210-213.
- [13] Kondrat'ev N.N. Otkazy i defekty sudovykh dizelej. – M.: Transport, 1985. – 152 s.
- [14] Pogodaev L.I., Shechenko P.A. Gidroabrazivnyj i kavitacionnyj iznos sudovogo oborudovaniya. – L.: Sudostroenie. 1984. – 263 s.
- [15] Stroganov G.B.Splavy alyuminiya s kremniem/G.B. Stroganov, V.A. Rottenberg, G.B. Gershman.// Splavy alyuminiya k kremniem, M.; Metallurgiya, 1979.- 185 s.

Статья поступила в редакцию 25.10.2019 г.