

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2020 Issue: 07 Volume: 87

Published: 23.07.2020 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



Nasriddin Mexriyevich Obitov

Navoi State Mining Institute

Senior Lecturer to

Department of Technology Engineering,

Navoi, Uzbekistan

nobitov@bk.ru

INCREASING THE STRENGTH OF ALUMINUM ALLOYS

Abstract: the article deals with the main properties of aluminum alloys, methods of strengthening aluminum alloys, mechanisms of strengthening aluminum, deformation strengthening of aluminum, plastic deformation of aluminum, the most common types of heat treatment of aluminum alloys. Hardening of aluminum-based alloys by cold deformation. Characteristics and performance characteristics of the aluminum alloys used, the composition of special aluminum alloys, the concentration and properties of added alloying elements in aluminum alloys. Welding of aluminum alloys.

Key words: Performance qualities, metal hardening, deformation hardening, plastic deformation, production processes, aluminum alloys, multicomponent alloys, hardening by heat-hardening, structural materials, mechanical properties, concentration, properties, alloying elements.

Language: Russian

Citation: Obitov, N. M. (2020). Increasing the strength of aluminum alloys. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 07 (87), 145-150.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-07-87-34> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.07.87.34>

Scopus ASCC: 2210.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация: в статье рассмотрены основные свойства алюминиевых сплавов, методы упрочнения алюминиевых сплавов, механизмы упрочнения алюминия, деформационное упрочнение алюминия, пластическая деформация алюминия, самые распространенные виды термической обработки алюминиевых сплавов. Упрочнение сплавов на основе алюминия методом холодного деформирования. Характеристика и эксплуатационные качества используемых алюминиевых сплавов, состав специальных алюминиевых сплавов, концентрация и свойства добавляемых легирующих элементов в алюминиевых сплавах. нагартовка алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: Эксплуатационные качества, упрочнения металла, деформационное упрочнение, пластическая деформация, производственные процессы, алюминиевые сплавы, многокомпонентные сплавы, упрочнение методом нагартовки, конструкционный материалы, механические свойства, концентрация, свойства, легирующие элементы.

Введение

В последние годы был предложен новый подход, позволяющий добиться значительного увеличения прочности алюминиевых сплавов при сохранении высокой электропроводности.

Чистый алюминий – мягкий и пластичный.

Чистый алюминий, с содержанием алюминия 99,8 %, в отожженном состоянии имеет предел текучести менее 20 МПа (2 кг/мм²) и

относительное удлинение более 40 %. Чтобы сделать такой алюминий пригодным для применения в качестве конструкционного материала к нему применяют различные методы упрочнения. [1].

Три механизма упрочнения алюминия

Сущность упрочнения металла заключается в том, что в его решетку тем или другим образом вводятся препятствия для движения дислокаций.

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

Для алюминия эффективными являются три основных механизма упрочнения это:

- деформационное упрочнение (наклеп, нагартовка);
- упрочнение за счет образования твердого раствора легирующего элемента в алюминии (закалка);
- упрочнение в результате выделения в алюминии вторичных фаз (старение).

В свою очередь, алюминиевые сплавы могут классифицироваться по преобладающему механизму их упрочнения. [1].

Деформационное упрочнение алюминия

Дислокации двигаются по наиболее плотно упакованным плоскостям атомной решетки. Эти плоскости называются плоскостями скольжения. Так как кристаллическая решетка алюминия является гранецентрированной кубической, то у него имеется четыре эквивалентных плоскости скольжения с тремя направлениями скольжения каждая. Это дает в сумме 12 систем скольжения. В зависимости от преобладающего напряженного состояния обычно активными являются несколько систем скольжения. Поэтому при деформации

алюминия постоянно происходит взаимодействие дислокаций различных плоскостей скольжения. В результате этого формируются плотные клубки дислокаций, которые представляют собой препятствия для дальнейшего движения дислокаций. Около этих препятствий возникают поля интенсивных локальных напряжений. Этот механизм работает для всех металлических сплавов, которые подвергаются пластической деформации.

Деформационное упрочнение путем холодной прокатки, волочения или растяжения является эффективным способом повышения прочности алюминиевых сплавов, которые не поддаются термическому упрочнению. [1].

Пластическая деформация алюминия

Все металлы и алюминий тоже - имеют кристаллическую атомную решетку. Пластическая деформация металлов происходит за счёт существования в их атомной решетке линейных дефектов – дислокаций. Пластическая деформация происходит путем движения этих дислокаций, так, например, как показано на рисунке.

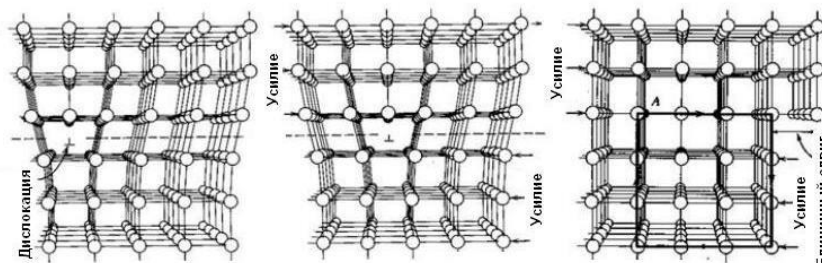


Рисунок 1.- Пластическая деформация путем движения дислокации через атомную решетку пластичного металла

Упрочнение алюминия путем добавления дополнительных компонентов (легирувания).

Алюминий, для того чтобы использовать, должен отвечать требованиям по прочности. Насчитывают около 300 вариаций сплавов алюминия с другими элементами.

Алюминиевые сплавы с различными химическими компонентами применяют для деталей конструкций и силовых элементов. Все эти сплавы разделяют на деформируемые и литейные. Деформируемые алюминиевые сплавы делятся на сплавы, которые подвергаются термической обработке (упрочняемые) и те, которые по своим свойствам подвергаться ей не могут (не упрочняемые). К первым относятся многокомпонентные сплавы, в основе которых помимо алюминия и магния присутствуют либо кремний, либо медь, либо цинк. Ко вторым относят технический алюминий

и двухкомпонентные (на основе алюминий-марганец и алюминий-магний) сплавы.

Каждый из легирующих элементов имеет свои специфические свойства: марганец и магний повышают механические свойства, а также марганец улучшает антикоррозионные свойства, а магний уменьшает массу сплава, однако при очень большом содержании может снизить величину модуля упругости. Медь чаще всего применяется в дуралюминах (группе высокопрочных сплавов из алюминия) и значительно повышает прочность, но понижает пластичность и антикоррозионные свойства. Медь советуют добавлять вместе с магнием. Кремний придает жидко текучесть, легкоплавкость, однако также уменьшает пластичность. Цинк хорошо упрочняет алюминий, его также советуют добавлять вместе с магнием. Помимо вышеперечисленных элементов, в сплавы в виде легирующих добавок вводятся хром, ванадий, титан, цирконий, и пр.

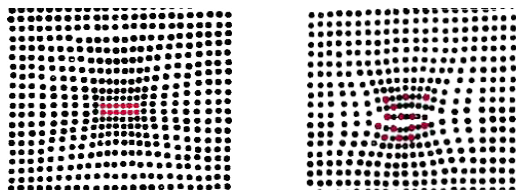
Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

Все тройные и многокомпонентные алюминиевые сплавы имеют более-менее определенный химический состав. Просто легированные сплавы, как правило, не используются при изготовке конструкций. Их составляющие компоненты подобраны главным образом для того, чтобы получить эффективный состав упрочняющих фаз, который после подвергания специальной термической обработке позволил бы как можно больше повысить прочность сплава и сохранить при этом хорошие технологические свойства. Способность к прессованию, прокатке, сварке, резке и стойкости против коррозии. Закалка изделий с последующим старением (отпуском является специальным способом термической обработки, которая придает сплаву больше прочности



Также многокомпонентные сплавы могут упрочняться методом нагартовки.

Нагартовка или деформационное упрочнение - это важный технологический процесс, которые применяют для увеличения прочности и/или твердости металлов и сплавов, которые не могут быть упрочнены термической обработкой. Эта технологическая обработка включает изменение формы изделия методами холодной пластической деформации, то есть ввода в металл механической энергии [3,6]. В результате этой обработки металл становится прочнее тверже, но теряет пластичность, как показано на рисунке 1.

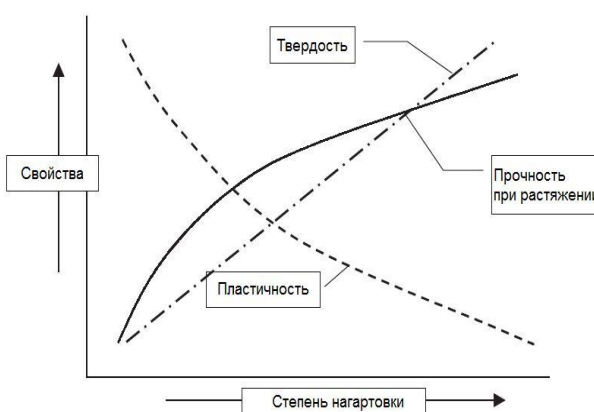


Рисунок 2. - Влияние степени нагартовки на прочность, твердость и пластичность металлов.

Упрочнение алюминия путем термической обработки.

Самыми распространенными видами термической обработки являются отжиг, отпуск (старение), закалка и термическая обработка вместе с другими видами воздействий - механическими, химическими, ударными, ультразвуковыми.

Отжиг. Во время отжига отсутствуют фазовые превращения, и зависимо от начального состояния металла и нужных качеств может происходить в виде рекристаллизации, гомогенизации и возврата (отжига) для снятия остаточных напряжений. Сплавы подвергают отжигу с целью перевода структуры металла из неустойчивого состояния в устойчивое, однородное, которое характеризуется мелкозернистостью. [4].

Во время отжига почти восстанавливаются имевшиеся до деформации или старения физические и механические свойства. Однако при этом уменьшается прочность и увеличивается

пластичность и ударная вязкость. Это используют во время технологических операций по изготовлению алюминиевых конструкций с применением отдельных термообработываемых сплавов.

Закалка. Так называют процесс, применяющейся к сплавам, которые в твердом состоянии проходят фазовые изменения. Эти процессы способствуют увеличению прочности. Они основываются на том, что при нагревании сплава выше предельной линии растворимости и ниже температуры солидуса наблюдается α - твердый раствор. При воздействии нормальных температур он неустойчив и в процессе старения из него выделяются элементы, которые в комплексе с алюминием образуют химические соединения - упрочнители.

Старение закаленных сплавов алюминия.

После закалки алюминиевого сплава следует **старение**, когда сплав выдерживают при комнатной температуре несколько суток (естественное старение) или в течение 10 — 24 ч

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

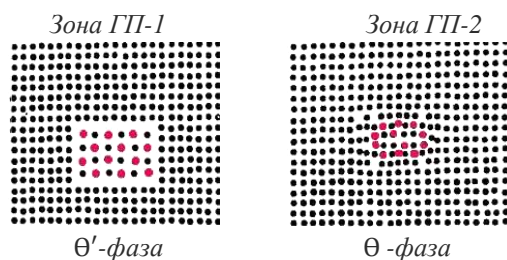


Рисунок 3.- Схема выделения избыточных фаз твердого раствора при старении: а – зоны ГП – 1; б – зоны ГП -2; в – θ' – фаза ; г - θ – фаза (CuAl_2).

при повышенной температуре (искусственное старение). В процессе старения происходит распад пересыщенного твердого раствора, что сопровождается упрочнением сплава.

Распад пересыщенного твердого раствора, в решетке которого атомы меди располагаются статистически равномерно, происходит в несколько стадий в зависимости от температуры и продолжительности старения. При естественном (при 20°C) или низкотемпературном искусственном старении (ниже $100 - 150^\circ\text{C}$) не наблюдается распада твердого раствора с выделением избыточной фазы; при этих температурах атомы меди перемещаются только внутри кристаллической решетки α -твердого раствора на весьма малые расстояния и собираются по плоскостям $\{100\}$ в пластинчатые образования или диски - зоны Гинье - Престона (ГП-1). Зоны ГП-1 в сплавах Al-Cu протяженностью 1- 10 нм и толщиной 0,5-1 нм более или менее равномерно распределены в пределах каждого кристалла. Концентрация меди в зонах ГП-1 меньше, чем в CuAl_2 (54%). Если сплав после естественного старения кратковременно (несколько секунд или минут) нагреть до $230 - 270^\circ\text{C}$ и затем быстро охладить, то упрочнение полностью снимается и свойства сплава будут соответствовать свежезакаленному состоянию. Это явление получило название возврата после старения. Разупрочнение при возврате связано с тем, что зоны ГП-1 при этих температурах оказываются нестабильными и поэтому растворяются в твердом растворе, а атомы меди вновь более или менее равномерно распределяются в пределах объема каждого кристалла твердого раствора, как и после закалки. При последующем вылеживании сплава при комнатной температуре вновь происходит образование зон ГП-1 и упрочнение сплава.

Однако после возврата и последующего старения ухудшаются коррозионные свойства сплава, что затрудняет использование возврата для практических целей.

Длительная выдержка при 100°C или несколько часов при 150°C приводит к образованию зон Гинье- Престона большей величины (толщина 1 - 4 нм и диаметр 20 - 30 нм)

с упорядоченной структурой, отличной от α -твердого раствора. Концентрация меди в них соответствует содержанию ее в CuAl_2 .

Такие зоны в сплавах Al - Cu принято называть ГП-2. С повышением температуры старения процессы диффузии, а, следовательно, и процессы структурных превращений протекают быстрее. Выдержка в течение нескольких часов при высоких температурах ($150 - 200^\circ\text{C}$) приводит к образованию в местах, где располагались зоны ГП-2, дисперсных (тонкопластинчатых) частиц промежуточной θ' -фазы, не отличающейся по химическому составу от стабильной θ -фазы (CuAl_2), но имеющей отличную кристаллическую решетку. θ' -фаза частично когерентно связана с твердым раствором.

Повышение температуры до $200 - 250^\circ\text{C}$ приводит к коагуляции метастабильной фазы и к образованию стабильной θ -фазы, имеющей с матрицей некогерентные границы. Таким образом, при естественном старении образуются лишь зоны ГП-1. При искусственном старении последовательность структурных изменений в сплавах Al-Cu можно представить в виде следующей схемы: ГП-1 \rightarrow ГП-2 \rightarrow θ' \rightarrow θ . [4,6].

В упрочнении сплавов зоны Гинье - Престона играют решающую роль: чем устойчивее зоны, тем стабильнее свойства сплава. На устойчивость зон оказывают влияние многие факторы: соотношение размеров атомов матрицы и легирующих компонентов, входящих в зоны, степень искажения кристаллической решетки матрицы при образовании зон.

Однако это не означает, что одно образование «на месте» переходит в другое. Возможно, что возникновение последующего образования или фазы происходит после растворения исходного.

Эта общая схема распада пересыщенного твердого раствора в сплавах Al-Cu справедлива и для других сплавов. Различие сводится лишь к тому, что в разных сплавах неодинаков состав и строение зон, а также образующихся фаз.

Для стареющих алюминиевых сплавов разных составов существуют и свои температурно-временные области зонного

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	РИИЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.997	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

(образование ГП-1 и ГП-2) и фазового (θ' и θ -фаз) старения.

Величина упрочнения при закалке и старении зависит от природы фазы упрочнителя, размеров их частиц, количества их и распределения. Наибольшее упрочнение сплавов достигается благодаря $MgZn_2$, Mg_2Si и S-фазы (Al_2CuMg), имеющих сложную структуру и состав, отличный от α -твердого раствора. [8,11].

После зонного старения сплавы чаще имеют повышенный предел текучести и относительно невысокое отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_{в}$ ($\leq 0,6-0,7$), повышенную пластичность, хорошую коррозионную стойкость и низкую чувствительность к хрупкому разрушению. Это объясняется тем, что дислокации при деформации пересекают зоны, не создающие значительного сопротивления начальным деформациям. Отсутствие границы раздела между зонами ГП-1 или ГП-2 с матричной фазой определяет хорошее сопротивление коррозии.

После фазового старения отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_{в}$ повышается до 0,9- 0,95, а пластичность, вязкость, сопротивление хрупкому разрушению и коррозии под напряжением снижаются. В этом случае при деформации дислокации огибают частицы метастабильных фаз, образуя многочисленные дислокационные петли и отдельные скопления. Как следствие этого, сопротивление начальным деформациям повышается, а пластичность уменьшается. В процессе коагуляции образовавшихся фаз

(коагуляционное старение) прочностные свойства на начальной стадии сначала возрастают, достигая максимального значения, а затем снижаются. Пластичность, вязкость и сопротивление коррозии возрастают.

Старение (отпуск). Это название важной производственной операции, во время которой кристаллическая решетка приводится в более устойчивое состояние. Тонкие пластинчатые образования, выделяющиеся в процессе старения, носят название зоны Гинье-Престона. Это зоны, где наблюдается повышенная концентрация растворенного компонента. Они располагаются внутри кристалла. В зависимости от того, при какой температуре происходит процесс отпуска, различают естественное и искусственное старение (отпуск). При естественном старении продукты выдерживаются при низких и нормальных температурах, и искусственное предполагает повышение температуры до 432-473 К.

Прочность, получаемая путем естественного отпуска, набирается за 5-7 суток. Сроки отпуска при искусственном старении зависят от состава сплава и требований к нему. Время выдержки при нагреве составляет от 15 до 200 минут и колеблется в зависимости от максимальной толщины требуемого профиля. Время выдержки при нагреве составляет от 15 до 200 минут и колеблется в зависимости от максимальной толщины требуемого профиля.

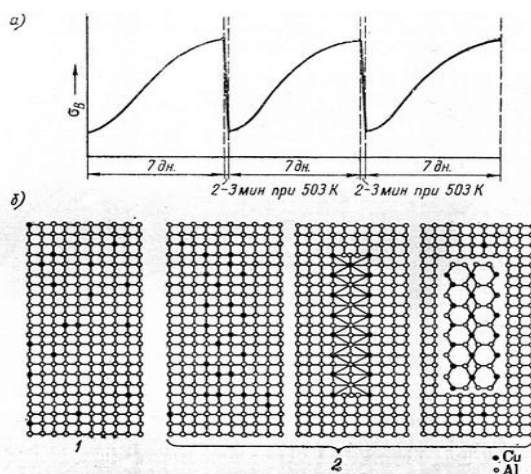


Рисунок 4- Влияние термообработки на прочность и структуру упрочненного алюминия
а -кривые старения дуралюмина после возврата к свежезакаленному состоянию;
б- схема образования зон Гинье-Престона:
1- свежезакаленное состояние; 2- состаренное состояние.

Нагрев (термообработка) изделий происходит в электрических вертикальных печах, имеющих круглое или прямоугольное сечение камеры. Под этими печами находятся баки со

средой, в которой металлические профили поддаются обработке.

На рисунке наглядно представлено влияние термообработки на прочностные и структурные параметры упрочненного алюминия.

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

Исходя из того, в каком режиме и каким способом алюминиевые профили и листы подвергались термической обработке, они обозначаются следующими буквами: отожженные - М, закаленные и естественно состаренные - Т, закаленные и искусственно состаренные - Т1. Горячепрессованные профили и горячекатаные листы специальной буквой не обозначаются.

Упрочнение сплавов на основе алюминия методом холодного деформирования.

При использовании способа холодного деформирования нагартовка осуществляется путем прокатки через валики. Разрушение межкристаллических прослоек и запрессовывание нагартовкой усадочных пор и пузырей, которое

происходит в результате холодного деформирования, обеспечивает более плотный контакт внутри кристаллитов.

От степени нагартовки зависит, насколько повышается прочность сплава, и как уменьшаются его пластические свойства. [5,6].

Этот способ повышения механической прочности получил широкое распространение при работе с не упрочняемыми сплавами на основе алюминий-магний, которые, как понятно по их названию, не поддаются термической обработке, о которой шла речь в начале статьи. Наиболее эффективным считается упрочнять такие сплавы после обжата на 20%.

References:

1. (n.d.). Retrieved from aluminium – guide. com.
2. (2016). Ribakov Sposobi uprochneniya alyuminiya. *Metallurgicheskaya i gornaya promishlennost*. Jurnal ISSN 20760507, №7.
3. (2002). *The welding of aluminium and its alloys*. Gene Matners – Woodhead Publishing Ltd.
4. Laxtin, Yu. M., & Leonteva, V. P. (1980). *Materialovedeniye*. (pp.340-334). Moskva: Mashinostroyeniye.
5. Artyomyva, N. (1976). *Alyuminiyeviy konstruksi* I L STROYIZDAT, p.208.
6. (n.d.). Retrieved from www. Aluminium – guide.ru
7. Antipov, V.V., Senatorova, O.G. & Tkachenko, Y.A. (2013). Visokoprochniye alyuminiyeviy splavi. *Svetniye metalli*, №9, pp. 63-65.
8. Romanenko, Yu.Yu. (2017). Promishlennoye osnovaniye visokoprochnogo splava B-1469 sistemi Al-Cu - Li-Mg. *Trudi VIAM: electron. Nauchno – texnicheskij . Jurnal*.
9. Xoxlatova, L.B., et al. (2009). Perspektivniy alyuminiyevoy-litiyeviy splav 1424 dlya svarnix konstruksiy izdeliy aviakosmicheskoy texnike. *Svarochnoye proizvodstvo*, №3, pp.7-10.
10. Kablov, Ye.N., Antipov, V.V., & Klochkova, Yu.Yu. (2016). Alyuminiy-litiyeviy splavi novogo pokoleniya i sloistiye alyumostekloplastiki na ix osnove. *Svetniye metalli*, №8, pp.86-91.
11. Belov, N.A., Zolotorevskiy, V.S., & Yevseev, Yu.V. (1984). Vliyaniye izbitochhix faz na vyazkost razrusheniya litogo splava sistemi Al-Mg-Zn. *Svetnaya metallurgiya*, №3, pp.78-82.
12. Antipov, V.V. (2012). Texnologichniy alyuminiy-litiyeviy splav 1441 i sloistiye gibridniye kompozite na yego osnove. *Metallurg*, №5, pp.36-39.