

УДК: 669.71:620.18

doi 10.70769/3030-3214.SRT.2.4.2024.48

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ В СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



**Эшонкулов Учкун
Худайназар угли**

Доцент кафедры «Геология и горное дело», Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Узбекистан
ORCID ID: 0009-0002-8415-7218



**Зуевич София
Александровна**

Преподаватель кафедры «Горные работы», Белорусский национальный технический университет, Белоруссия



**Бильдзюк Егор
Викторович**

Старший преподаватель кафедры «Горные работы», Белорусский национальный технический университет, Белоруссия

Аннотация. Статья посвящена свойствам алюминия, элементу III группы Периодической таблицы, с порядковым номером 13 и атомной массой 26,98. Рассматриваются его физико-химические характеристики, включая низкую плотность ($2,7 \text{ г/см}^3$), высокую электропроводность (65% от меди) и теплопроводность ($238,3 \text{ Вт/(м·К)}$). Подробно описаны различные марки алюминия, его коррозионная стойкость, а также механические свойства, отличающиеся в зависимости от чистоты и обработки. Алюминий используется в виде полуфабрикатов (листов, прутков и профилей) и в виде сплавов, таких как Al-Mn, Al-Si и Al-Mg. В статье обсуждаются методы упрочнения алюминиевых сплавов, такие как закалка и старение, а также их влияние на механические свойства и коррозионную стойкость. Приведены данные о распаде твердого раствора и процессе старения, а также о структурном упрочнении, что повышает прочность и пластичность алюминия. Статья содержит иллюстрации, демонстрирующие микроструктуру сплавов и зависимости их свойств от температуры и времени старения.

Ключевые слова: Алюминий, периодическая система, физико-химические свойства, плотность, электропроводность, теплопроводность, коррозионная стойкость, механические свойства, закалка, старение, сплавы, деформируемые сплавы, литейные сплавы, структурное упрочнение, микроструктура, упругость, деформация, твердое растворение, гинье-престон зоны, температура рекристаллизации.

ALYUMINIYNING FIZIK-KIMYOVIY XUSUSIYATLARI VA UNING QOTISHMALARINING ZAMONAVIY SANOATDA QO‘LLANILISHI

Eshonqulov Uchqun
Xudonazar o'g'li

"Geologiya va konchilik ishi"
kafedrası dotsenti, Qarshi
muhandislik-iqtisodiyot instituti,
Qarshi, O'zbekiston

Zuevich Sofiya
Aleksandrovna

"Konchilik ishi" kafedrası
o'qituvchisi, Belorussiya Milliy
Texnika Universiteti, Belorussiya

Bildziuk Yahor
Viktorovich

"Konchilik ishi" kafedrası katta
o'qituvchisi, Belorussiya Milliy
Texnika Universiteti, Belorussiya

Annotatsiya. Maqola alyuminiy, ya'ni Mendeleyevning davriy jadvalining III guruhiga mansub, 13-tartib raqamiga ega va atom massasi 26,98 bo'lgan elementning xususiyatlariga bag'ishlangan. Unda alyuminiyning fizik-kimyoviy xususiyatlari, jumladan, uning past zichligi ($2,7 \text{ g/sm}^3$), yuqori elektr o'tkazuvchanligi (misning 65%) va issiqlik o'tkazuvchanligi ($238,3 \text{ Wt/(m}\cdot\text{K)}$) batafsil yoritilgan. Maqolada alyuminiyning turli markalari, uning korroziyaga chidamliligi, shuningdek, tozaligi va ishlov berish usuliga qarab o'zgaradigan mexanik xususiyatlari haqida ma'lumotlar keltirilgan. Alyuminiy yarim tayyor mahsulotlar (varaqlar, tayoqlar va profillar) ko'rinishida, shuningdek, Al–Mn, Al–Si va Al–Mg kabi qotishmalar shaklida qo'llaniladi. Maqolada alyuminiy qotishmalarini mustahkamlash usullari, masalan, qotirish va qaritish (yoshartirish) hamda ularning mexanik xususiyatlar va korroziyaga chidamlilikka ta'siri muhokama qilingan. Shuningdek, qattiq eritmaning parchalanishi, qaritish jarayoni va tuzilmaviy mustahkamlash bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan bo'lib, bu alyuminiyning mustahkamligi va plastikligini oshiradi. Maqolada qotishmalarning mikrotuzilmasini, ularning xususiyatlarining harorat va qaritish vaqti bilan bog'liqligini ko'rsatadigan illyustratsiyalar keltirilgan.

Kalit so'zlar: Alyuminiy, davriy sistema, fizik-kimyoviy xossalari, zichligi, elektr o'tkazuvchanligi, issiqlik o'tkazuvchanligi, korroziyaga chidamliligi, mexanik xossalari, toblanishi, eskirishi, qotishmalari, deformatsiyalanuvchi qotishmalari, quyma qotishmalari, strukturaviy mustahkamlanishi, mikrostrukturasi, elastikligi, deformatsiyalanishi, qattiq erishi, Gine-preston zonasi, rekristallanish harorati.

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF ALUMINUM AND ITS ALLOYS AND THEIR APPLICATIONS IN MODERN INDUSTRY

Eshonkulov Uchkun
Khudaynazar ugli

Associate Professor of the
Department of Geology and Mining,
Karshi Engineering-Economics
Institute, Karshi, Uzbekistan

Zuevich Sofia
Alexandrovna

Lecturer of the Department of
Mining, Belarusian National
Technical University, Belarus

Bildziuk Yahor
Victorovich

Senior lecturer of the Department of
Mining, Belarusian National
Technical University, Belarus

Abstract. The article is devoted to the properties of aluminum, an element of the III group of the periodic table, with an order number of 13 and an atomic mass of 26.98. Its physicochemical characteristics are considered, including low density (2.7 g/cm^3), high electrical conductivity (65% of copper), and thermal conductivity ($238.3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). The various grades of aluminum, its corrosion resistance, as well as its mechanical properties, which differ depending on its purity and processing, are described in detail. Aluminum is used in the form of semi-finished products (sheets, rods and profiles) and in the form of

alloys such as Al-Mn, Al-Si and Al-Mg. The article discusses methods for strengthening aluminum alloys, such as hardening and aging, as well as their influence on mechanical properties and corrosion resistance. Data on the decomposition of the solid solution and the aging process, as well as on the structural strengthening, which increases the strength and plasticity of aluminum, are presented. The article contains illustrations demonstrating the microstructure of alloys and the dependence of their properties on temperature and aging time.

Keywords: Aluminum, periodicity, physicochemical properties, density, electrical conductivity, thermal conductivity, corrosion resistance, mechanical properties, quenching, aging, alloys, deformable alloys, cast alloys, structural strength, microstructure, elasticity, deformation, hard solubility, gyne-prestone zone, recrystallization temperature.

Введение. Алюминий – элемент III группы Периодической системы элементов порядковый номер 13, атомная масса 26,98. Температура плавления 660°C. Алюминий имеет кристаллическую г.ц.к. решетку с периодом $a = 0,40412$ нм. Наиболее важной особенностью алюминия является низкая плотность $2,7 \text{ г/см}^3$ против $7,8 \text{ г/см}^3$ для железа и $8,9 \text{ г/см}^3$ для меди. Алюминий обладает высокой электропроводностью, составляющей 65% от электропроводности меди. Теплопроводность составляет 238,3 Вт/(м К). В зависимости от чистоты различают алюминий особой чистоты А999 (99,999% Al) высокой чистоты А995 (99,995% Al), А99 (99,99% Al), А97 (99,97% Al), А95 (99,95% Al) и технической чистоты А85, А8, А7, А6, А5, АО (99,0 % Al).

Технический алюминий изготавливается в виде листов, профилей, прутков, проволоки и других полуфабрикатов, маркируется АД и АД1. В качестве примесей в алюминии присутствуют Fe, Si, Cu, Mn, Zn, Ti.

Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой проч-

ной пленки Al_2O_3 . Чем чище алюминий, тем выше его коррозионная стойкость. Механические свойства отожженного алюминия высокой чистоты: $\sigma_B = 50 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 15 \text{ МПа}$, $\sigma = 50\%$ и технического алюминия (АДМ)* $\sigma_B = 80 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 30 \text{ МПа}$, $\sigma = 35\%$. Модуль нормальной упругости $E = 7 \text{ ГПа}$. Холодная пластическая деформация повышает σ_B технического алюминия (АДН) до 150 МПа, но относительное удлинение снижается до 6%. Благодаря высокой пластичности в отожженном состоянии алюминий легко обрабатывается давлением, но обработка резанием затруднена. Сваривается всеми видами сварки.

Применяется технический алюминий марок АД и АД1 для элементов конструкции и деталей, не несущих нагрузки, когда требуется высокая пластичность, хорошая свариваемость, сопротивление коррозии и высокая тепло- и электропроводность. Более широко используют сплавы алюминия.

Наибольшее распространение получили сплавы Al-Mn, Al-Si, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Mg-Si, а также Al-Zn-Mg-Cu. В равновесном состоянии эти сплавы представляют собой низколе-

гированный твердый раствор и интерметаллидные фазы CuAl_2 (θ -фаза), Mg_2Si , Al_2CuMg (S -фаза), Al_6CuMg_4 (T -фаза), Al_3Mg_2 , $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (T -фаза) и др. (рис. 1)

Обсуждение. Все сплавы алюминия можно разделить на две группы:

1) деформируемые, предназначенные для получения полуфабрикатов (листов, плит, прутков, профилей, труб и т.д.), а также поковок и штамповок путем прокатки, прессования,ковки и штамповки. Деформируемые сплавы, по способности упрочняться термической обработкой, делят на сплавы, неупрочняемые термической обработкой, и сплавы, упрочняемые термической обработкой;

2) литейные сплавы, предназначенные для фасонного литья.

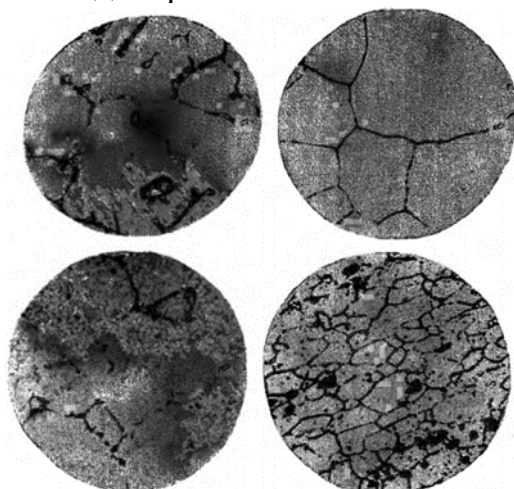


Рис.1. Микроструктура дуралюмина D16, X 200.

а-после литья ($\alpha + \text{CuAl}_2 + S$); б-после гомогенизации; в-после закалки (α –раствор); г—после закалки и естественного старения.

Для упрочнения алюминиевых сплавов применяют закалку и старение. Для устранения неравновесных структур и деформационных дефектов строения, снижающих пластичность сплава, применяют отжиг.

Растворимость большинства компонентов в алюминии при понижении температуры уменьшается (рис.2), что позволяет упрочнять сплавы путем закалки и старения.

Закалка алюминиевых сплавов – заключается в нагреве их до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы, полностью или большей частью растворяются в алюминии, выдержке при этой температуре и быстром охлаждении до комнатной температуры для получения пересыщенного твердого раствора. Например температура закалки сплавов системы Al-Cu (рис.2) определится линией abc , проходящей выше линии предельной растворимости для сплавов, содержащих $<5,6\%$ Cu , и ниже эвтектической линии (548°C) для сплавов, содержащих большее количество меди. При нагреве под закалку сплавов, содержащих до $5,6\%$ Cu , избыточная фаза CuAl_2 полностью растворится и при последующем быстром охлаждении фиксируется только пересыщенный α -твердый раствор, содержащий столько меди, сколько ее находится в сплаве. При содержании более $5,6\%$ Cu в структуре сплавов после закалки будет пересыщенный α -твердый раствор состава, отвечающего точке b , и нерастворенные при нагреве кристаллы соединения CuAl_2 . Время выдержки при температуре закалки, необходимое для растворения интерметаллидных фаз, зависит от структурного состояния сплава, типа печи и толщины изделия. Листы, прутки, плиты, полосы толщиной $0,5-150\text{мм}$ при нагреве в селитровых ваннах выдерживают $10-80$ мин, а при нагреве в наиболее широко применяемых для этой цели электропечах с принудительной

циркуляцией воздуха 30-210 мин. Выдержка фасонных отливок при температуре закалки более длительная (2-15 ч); за это время растворяются грубые выделения интерметаллидных фаз.

Скорость охлаждения при закалке должна быть выше критической, под которой понимают наименьшую скорость охлаждения, не вызывающую распад твердого раствора. Охлаждение деформированных сплавов после закалки проводят в холодной воде, а фасонных отливок в подогретой воде (50-100°C) во избежание их коробления и образования трещин.

Старение закаленных сплавов. После закалки следует старение, когда сплав выдерживают при комнатной температуре несколько суток (естественное старение) или в течение 10-24 ч 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°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°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 (рис.2). Концентрация меди в них соответствует содержанию её 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°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 (рис.2).

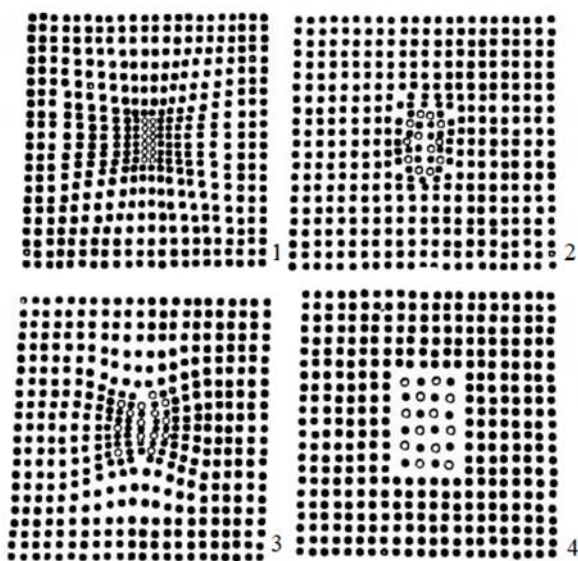


Рис.2. Последовательные стадии распада твердого раствора меди в алюминии:

1- зоны ГП-1, 2- промежуточная θ' -фаза, 3- зоны ГП-2, 4- образование θ -фазы, (CuAl_2).

Повышение температуры до 200-250°C приводит к коагуляции метастабильной фазы и к образованию стабильной θ -фазы (рис.2), 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' $\rightarrow$ $\theta(\text{CuAl}_2)$.

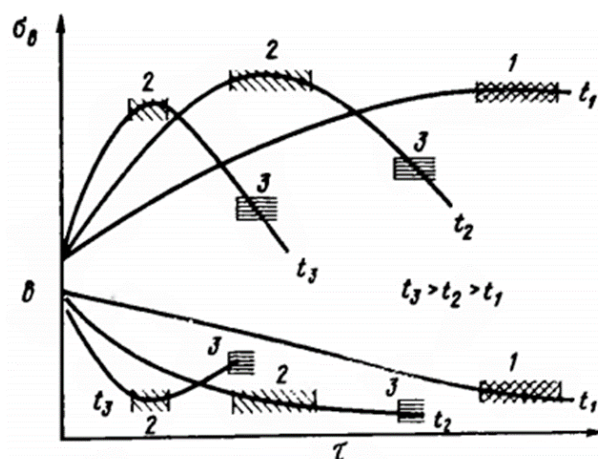


Рис.3. Зависимость механических свойств алюминиевых сплавов от продолжительности старения при разных температурах:

1-зонное старение; 2-фазовое старение; 3 - коагуляционное старение.

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 (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.

После зонного старения сплавы чаще имеют повышенный предел текучести и относительно невысокое отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ ($\leq 0,6 \div 0,7$), 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 ГГ-1 или ГП-2 с матричной фазой определяет хорошее сопротивление коррозии.

После фазового старения отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ 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. На рис.3 показано изменение механических свойств алюминиевых сплавов в зависимости от продолжительности старения при разных температурах.

Температура рекристаллизации некоторых сплавов алюминия с марганцем, хромом, никелем, цирконием, титаном и другими переходными металлами, подвергнутых по определенным режимам

горячей, а в некоторых случаях и холодной обработке давлением, превышает обычно назначаемую температуру нагрева под деформацию или закалку. Поэтому после закалки и старения таких сплавов в них сохраняется нерекристаллизованная (полигонизованная) структура с высокой плотностью дислокаций, что значительно повышает прочность по сравнению с рекристаллизованной структурой. Это явление получило название структурного упрочнения.

Результаты и выводы. В результате структурного упрочнения значения $\sigma_{0,2}$ и σ_B повышаются до 30–40%. Наиболее сильно структурное упрочнение проявляется в прессованных полуфабрикатах (прутки, профили, трубы), поэтому это явление применительно к ним называют пресс-эффектом.

В статье подробно рассмотрены химические и физические свойства алюминия, а также изменения, происходящие в различных его сплавах. Низкая плотность, высокая коррозионная стойкость и хорошие проводящие свойства делают алюминий идеальным материалом для использования в различных отраслях. Производятся сплавы с различной чистотой, что позволяет применять их для создания разнообразных конструкций и компонентов. Для повышения прочности и механических свойств алюминиевых сплавов применяются процессы закалки и старения. Таким образом, алюминий и его сплавы находят широкое применение в современных технологиях, включая авиацию, транспорт и строительство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.М.Лахтин. Металловедение и термическая обработка металлов// Москва, «Металлургия», 1984.
2. Kh, E. U. (2023). TECHNOLOGY FOR OBTAINING REDUCED IRON FROM PYRITE CINDERS. *Western European Journal of Modern Experiments and Scientific Methods*, 1(4), 120-125.
3. Эшонкулов, У. Х. У. (2022). ХАРАКТЕРИСТИКА И ТИПЫ ЖЕЛЕЗНЫХ СЫРЬ. *BARQARORLIK VA YETAKCHI TADQIQOTLAR ONLAYN ILMIY JURNALI*, 2(11), 303-308.
4. Хасанов, А. С., & Эшонкулов, У. Х. (2023). ПОДГОТОВКА ИСХОДНОГО ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ К ПЕРЕРАБОТКЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ. *ARXITEKTURA, MUHANDISLIK VA ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALAR JURNALI*, 2(4), 34-46.
5. Эшонкулов, У. Х., & Турдиев, Ж. Н. (2023). ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ШЛАМОВ. *ARXITEKTURA, MUHANDISLIK VA ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALAR JURNALI*, 2(1), 32-36.
6. Abdurashid Khasanov, & Uchkun Eshonkulov. (2023). STUDY OF METHODS OF IRON SEPARATION FROM IRON-CONTAINING RAW MATERIALS. *Best Journal of Innovation in Science, Research and Development*, 2(11), 119–123. Retrieved from <https://www.bjisrd.com/index.php/bjisrd/article/view/818>.
7. Турдиев, Ш. Ш., & Эшонкулов, У. Х. (2023). ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ЦИНКОВЫХ ОТХОДОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКЕ. *Наука и технология в современном мире*, 2(18), 28-32.
8. Турдиев, Ш. Ш., & Эшонкулов, У. Х. (2023). ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ «КАЛЬМАКЫР». *Наука и технология в современном мире*, 2(18), 33-38.
9. Турдиев, Ш. Ш., & Эшонкулов, У. Х. (2023). СПОСОБЫ ОЧИСТКИ КОНЦЕНТРАТОВ ПЛАТИНОИДОВ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ. *Наука и технология в современном мире*, 2(18), 23-27.
10. Eshonqulov, U. X. (2023). TEMIR TARKIBLI XOM ASHYODAN VA MA'DANLARDAN TEMIRNI AJRATIB OLIHNING TEXNOLOGIK O'LCAMLARINI TADQIQ QILISH VA ANIQLASH. *Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности*, 1(2), 64-69.