



ALYUMINIY QOTISHMALARINING MEXANIK XOSSALARINI YAXSHILASHDA TERMİK ISHLOV BERISHNING AHAMIYATI

Xakimova Sevara Xamdamovna
Toshkent kimyo-texnologiya instituti

Annotatsiya: Ushbu maqolada alyuminiy qotishmalarining mexanik xossalari yaxshilashda termik ishlov berishning ahamiyati ilmiy adabiyotlar asosida tahlil qilindi. Tadqiqotning asosiy e'tibori eritma bilan termik ishlov berish, sovitish va qaritish bosqichlarining qotishma mikrostrukturasi hamda mexanik xossalarga ta'sirini aniqlashga qaratildi. Alyuminiy qotishmalarining termik ishlovga javobi qotishmaning kimyoviy tarkibi, harorat, ushlab turish vaqti, sovitish tezligi va qaritish sharoitlari bilan belgilanadi. Adabiyotlar tahlili 2xxx, 6xxx va 7xxx seriyali qotishmalarda cho'ktirish orqali mustahkamlash mexanizmi muhim ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatdi. Ayniqsa, 6082 qotishmasida eritma bilan ishlov berish va sun'iy qaritish mexanik xossalarning sezilarli o'zgarishiga olib kelishi, AA7075 qotishmasida esa sovitish tezligi cho'kma fazalarning shakllanishi va qattqlik taqsimotiga ta'sir qilishi aniqlangan. Shu bilan birga, yuqori mustahkamlikka erishish ayrim hollarda plastiklikning kamayishi bilan kechishi mumkin. Natijada termik ishlov rejimini tanlashda faqat mustahkamlikning maksimal qiymatini emas, balki mustahkamlik, plastiklik va ekspluatatsion barqarorlikning maqbul nisbatini hisobga olish zarurligi asoslandi.

Kalit so'zlar: alyuminiy qotishmalari, termik ishlov, eritma bilan ishlov berish, sovitish, qaritish, mikrostruktura, cho'kma fazalar, qattqlik, mustahkamlik, plastiklik.

Аннотация: В статье на основе анализа научной литературы рассмотрено значение термической обработки для улучшения механических свойств алюминиевых сплавов. Основное внимание уделено влиянию растворяющей термической обработки, охлаждения и старения на микроструктуру и механические свойства сплавов. Установлено, что эффективность термической обработки определяется химическим составом сплава, температурой нагрева, временем выдержки, скоростью охлаждения и условиями старения. Анализ исследований сплавов серий 2xxx, 6xxx и 7xxx показал важную роль дисперсионного упрочнения в формировании механических свойств. При этом повышение прочности в некоторых случаях сопровождается снижением пластичности. Обоснована необходимость комплексного выбора параметров термической обработки с учетом требуемого сочетания прочности, пластичности и эксплуатационной стабильности.





Ключевые слова: алюминиевые сплавы, термическая обработка, растворяющая обработка, охлаждение, старение, микроструктура, выделения, твердость, прочность, пластичность.

Abstract: This paper analyzes the significance of heat treatment in improving the mechanical properties of aluminum alloys based on a review of scientific literature. Particular attention is given to the effects of solution heat treatment, cooling and aging on microstructural evolution and mechanical behavior. The effectiveness of heat treatment depends on alloy composition, heating temperature, holding time, cooling rate and aging conditions. Studies of 2xxx, 6xxx and 7xxx series alloys demonstrate the important role of precipitation strengthening in determining mechanical properties. However, an increase in strength may be accompanied by a reduction in ductility. Therefore, heat treatment parameters should be selected comprehensively to achieve an appropriate combination of strength, ductility and service stability.

Key words: aluminum alloys, heat treatment, solution treatment, cooling, aging, microstructure, precipitates, hardness, strength, ductility.

1. KIRISH

Yengil konstruksion materiallarga bo'lgan talabning ortishi mashinasozlik va transport texnikasida alyuminiy qotishmalaridan foydalanish ko'lamining kengayishiga olib kelmoqda. Alyuminiyning kichik zichligi, korroziyaga chidamliligi va yuqori solishtirma mustahkamligi uni turli konstruksion detallar uchun istiqbolli materialga aylantiradi [1–3]. Ayniqsa, material massasini kamaytirish bilan birga yetarli mustahkamlikni saqlab qolish talab etiladigan konstruksiyalarda alyuminiy qotishmalarining ahamiyati yuqori.

Alyuminiy qotishmalarining mexanik xossalarini shakllantirishda ularning kimyoviy tarkibi bilan bir qatorda mikrostrukturaviy holati ham muhim hisoblanadi. Donalar o'lchami, legirlovchi elementlarning taqsimlanishi, ikkilamchi fazalar va dispers cho'kmalar qotishmaning mustahkamligi, qattiqligi va plastik deformatsiyanishiga ta'sir ko'rsatadi [4,5].

Termik ishlov berish mazkur mikrostrukturaviy holatni o'zgartirishning samarali usullaridan biridir. Termik ishlov beriladigan alyuminiy qotishmalarida eritma bilan ishlov berish, tez sovitish va keyingi qaritish orqali cho'ktirish jarayonlarini nazorat qilish mumkin. Ushbu jarayonlar natijasida hosil bo'ladigan dispers fazalar dislokatsiyalar harakatiga qarshilik ko'rsatib, qotishmaning mustahkamligi va qattiqligini oshiradi [6,7].

Ilmiy manbalarda termik ishlov beriladigan alyuminiy qotishmalarining asosiy guruhlari sifatida 2xxx, 6xxx va 7xxx seriyalari ko'rsatiladi [6]. Biroq ushbu seriyalarning termik ishlovga javobi bir xil emas. Masalan, 6xxx seriyasida Mg-Si





asosidagi cho'kmalar muhim bo'lsa, 7xxx seriyasida Zn-Mg(-Cu) tizimidagi cho'kmalar yuqori mustahkamlash samaradorligini ta'minlaydi.

So'nggi tadqiqotlar mazkur masalaning dolzarbligini tasdiqlaydi. 2024-yilda e'lon qilingan tadqiqotda 6082 alyuminiy qotishmasining eritma bilan ishlov berish, sun'iy qaritish va kriogen ishlovdan keyingi mikrostrukturasi hamda mexanik xossalari o'rganilgan. Tadqiqotda termik ishlov sharoitining qotishmaning mustahkamligi va cho'kma fazalariga sezilarli ta'siri ko'rsatilgan [8].

2025-yilda Al-Mg-Si tizimidagi qotishmalar bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarda esa cho'ktirish orqali mustahkamlashning mustahkamlik va plastiklik o'rtasidagi muvozanatga ta'siri batafsil tahlil qilingan [9].

7xxx seriyali qotishmalar bo'yicha zamonaviy tadqiqotlarda ham termik ishlovning mikrostrukturaga ta'siri asosiy ilmiy yo'nalishlardan biri bo'lib qolmoqda. AA7075 qotishmasida sovitish tezligi va keyingi qaritish sharoitlari cho'kma fazalarning shakllanishi hamda qattqlikning taqsimlanishiga ta'sir qilishi ko'rsatilgan [10].

Tadqiqotning maqsadi — alyuminiy qotishmalarining mexanik xossalarini yaxshilashda termik ishlov berishning asosiy mexanizmlarini zamonaviy ilmiy manbalar asosida tahlil qilish hamda kelgusidagi eksperimental tadqiqotlar uchun muhim texnologik parametrlarni aniqlash.

Tadqiqot vazifalari:

Alyuminiy qotishmalarining termik ishlov berilish xususiyatlarini tahlil qilish;

eritma bilan ishlov berish va sovitishning mikrostrukturaga ta'sirini o'rganish; qaritish jarayonining mexanik xossalarga ta'sirini umumlashtirish;

2xxx, 6xxx va 7xxx seriyali qotishmalar bo'yicha zamonaviy tadqiqotlarni qiyosiy tahlil qilish;

kelgusidagi eksperimental tadqiqotlar uchun istiqbolli termik ishlov parametrlarini belgilash.

2. MATERIAL VA TADQIQOT USULLARI

Tadqiqot nazariy-tahliliy yondashuv asosida olib borildi. Maqolaning axborot bazasini alyuminiy qotishmalarining termik ishlovi, mikrostrukturasi, cho'ktirish orqali mustahkamlanishi va mexanik xossalarga bag'ishlangan ilmiy maqolalar hamda fundamental adabiyotlar tashkil etdi.

Manbalarni tahlil qilishda, birinchi navbatda, termik ishlov parametrlarining qotishma mikrostrukturasi va mexanik xossalarga ta'sirini bevosita o'rgangan tadqiqotlarga e'tibor qaratildi. Shuningdek, alyuminiy qotishmalarining termik ishlov mexanizmlarini umumlashtiruvchi sharh maqolalaridan foydalanildi [6,7,11].

Tahlil quyidagi ketma-ketlikda amalga oshirildi:





termik ishlov parametrlari → mikrostrukturaviy o'zgarish → cho'kma fazalar → dislokatsiyalar harakati → mexanik xossalar.

Asosiy tahlil parametrlari sifatida eritma bilan ishlov berish harorati, ushlab turish vaqti, sovitish tezligi, qaritish harorati va qaritish davomiyligi olindi.

Maqolada muallif tomonidan bajarilgan eksperimental natijalar keltirilmagan. Natijalar mavjud ilmiy tadqiqotlarning qiyosiy va umumlashtiruvchi tahliliga asoslangan.

3. NATIJALAR VA TAHLIL

3.1. Termik ishlovning alyuminiy qotishmalarini mustahkamlashdagi roli

Termik ishlov beriladigan alyuminiy qotishmalarida mustahkamlash jarayoni odatda eritma bilan ishlov berish, sovitish va qaritish bosqichlarining ketma-ketligi orqali amalga oshiriladi. Eritma bilan ishlov berish vaqtida qotishmadagi ayrim legirlovchi elementlar alyuminiy matritsasida eritiladi. Keyingi sovitish jarayonida o'ta to'yingan qattiq eritma hosil bo'ladi. Qarish vaqtida esa ortiqcha legirlovchi elementlar dispers cho'kma fazalar ko'rinishida ajraladi [6,7].

Cho'kmalarning o'lchami, shakli va taqsimlanishi dislokatsiyalarning harakatlanishiga ta'sir qiladi. Mayda va maqbul taqsimlangan cho'kmalar dislokatsiyalar harakatini cheklashi natijasida qotishmaning deformatsiyaga qarshiligi ortadi.

Shu sababli termik ishlov jarayoni qotishmaning mexanik xossalarini o'zgartirish bilan bir qatorda uning mikrostrukturaviy holatini shakllantiruvchi muhim metallurgik texnologiya hisoblanadi.

3.2. Eritma bilan termik ishlov berish

Eritma bilan ishlov berishdan ko'zlangan asosiy maqsad qotishma tarkibidagi mustahkamlovchi elementlarni alyuminiy matritsasida eritish va keyingi cho'ktirish jarayoni uchun zarur boshlang'ich holatni hosil qilishdir.

Bunda harorat va ushlab turish vaqti muhim parametr hisoblanadi. Haroratning yetarli emasligi legirlovchi elementlarning to'liq erimasligiga sabab bo'lishi mumkin. Haddan tashqari yuqori harorat esa ayrim fazalarning qisman erishi yoki donalar chegarasida nomaqbul o'zgarishlarni keltirib chiqarishi mumkin [6,11].

AA2017 alyuminiy qotishmasi bo'yicha 2024-yilgi tadqiqotda eritma bilan ishlov berish va keyingi sun'iy qaritish rejimlari qotishmaning mikrostrukturasi va mexanik xossalariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlangan. Tadqiqotda eritma bilan ishlov berishdan keyingi sovitish tezligi ham cho'ktirish orqali mustahkamlash jarayonining muhim omili sifatida qayd etilgan [12].

3.3. Sovitish tezligining ta'siri





Eritma bilan ishlovdan keyingi sovitish tezligi o'ta to'yingan qattiq eritmaning shakllanishini belgilovchi asosiy omillardan biridir. Tez sovitish legirlovchi elementlarning matritsada saqlanib qolishiga yordam beradi va keyingi qaritish jarayonida mayda cho'kmalar hosil bo'lishi uchun zarur sharoit yaratadi.

AA7075 qotishmasi bo'yicha 2025-yilgi tadqiqotda sovitish tezligi va sovitish sharoitlarining mikrostrukturadagi cho'kma fazalar taqsimotiga bevosita ta'sir qilishi ko'rsatilgan. Tadqiqotda tezroq sovitish yuqori darajadagi o'ta to'yingan holatni saqlash va keyingi qaritishda mayda mustahkamlovchi fazalarni shakllantirish uchun muhim ekanligi ko'rsatilgan [10].

Bundan tashqari, Al6061 qotishmasida tez sovitishdan keyingi qaritish jarayoni mayda va nisbatan bir tekis taqsimlangan Mg_2Si cho'kmalarining shakllanishi bilan bog'langan. 2025-yilda e'lon qilingan tadqiqotda tez sovitish va qaritishdan iborat T6-ga yaqin ishlov holati yuqori mexanik ko'rsatkichlar bilan bog'liqligi ko'rsatilgan [13].

3.4. Qarish jarayonining mexanik xossalarga ta'siri

Qarish jarayonida o'ta to'yingan qattiq eritmada dispers cho'kmalar shakllanadi. Ushbu fazalar qotishmaning mustahkamlanishida asosiy rol o'ynaydi.

Qarishning boshlang'ich bosqichlarida mayda cho'kmalar hosil bo'lib, dislokatsiyalar harakatiga sezilarli qarshilik ko'rsatishi mumkin. Qarish davomiyligi ortishi bilan cho'kmalar yiriklashib, ular orasidagi masofa ortishi natijasida mustahkamlash samarasi pasayishi ehtimoli mavjud.

Shuning uchun qarish jarayonida vaqt–harorat–mikrostruktura–xossa o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash muhimdir.

Al-Mg-Si qotishmalari bo'yicha 2025-yilgi tadqiqotda T6 holatida hosil bo'lgan cho'kmalar dislokatsiyalar harakatini sezilarli darajada cheklashi, natijada mustahkamlikning ortishi bilan birga plastiklik va shakllanuvchanlikning kamayishi mumkinligi ko'rsatilgan [9].

3.5. Turli alyuminiy qotishmalarining termik ishlovga javobi

Qotishma seriyasi	Asosiy legirlovchi tizim	Asosiy mustahkamlash mexanizmi	Termik ishlovning asosiy vazifasi
2xxx	Al–Cu–Mg	Cho'kma fazalar	Mustahkamlikni oshirish
6xxx	Al–Mg–Si	Mg-Si asosidagi cho'kmalar	Mustahkamlik va plastiklikni muvofiqlashtirish
7xxx	Al–Zn–Mg(-Cu)	Cho'ktirish orqali mustahkamlash	Yuqori mustahkamlikni shakllantirish



2xxx seriyasida Al-Cu-Mg tizimidagi fazalar, 6xxx seriyasida Mg-Si asosidagi cho'kmalar, 7xxx seriyasida esa Zn-Mg(-Cu) tizimidagi cho'kmalar termik ishlov natijasida mexanik xossalarning shakllanishida muhim rol o'ynaydi [6,7].

Zamonaviy sharhlarda alyuminiy qotishmalarining turli tizimlarida dispers cho'kmalarni shakllantirish va ularning barqarorligini ta'minlash mexanik xossalarni yaxshilashning asosiy yo'nalishlaridan biri sifatida ko'rsatilgan [14].

3.6. Mustahkamlik va plastiklik o'rtasidagi muvozanat

Termik ishlov berish natijasida mustahkamlikning ortishi har doim ham barcha mexanik xossalarning bir vaqtda yaxshilanishini anglatmaydi. Masalan, Al-Mg-Si qotishmasi bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotda T6 holatidagi cho'kmalar dislokatsiyalar sirpanishini cheklab, mustahkamlikni oshirishi bilan birga deformatsiyaning donalar chegaralari yaqinida konsentratsiyalanishiga va plastiklikning pasayishiga olib kelishi ko'rsatilgan [9].

Shu sababli termik ishlovning samaradorligini faqat qattqlik yoki mustahkamlikning maksimal qiymati bilan baholash yetarli emas. Muayyan detalning ekspluatatsiya sharoitiga qarab mustahkamlik, plastiklik, korroziyaga chidamlilik va boshqa xossalarning maqbul kombinatsiyasini ta'minlash talab etiladi.

3.7. 7xxx seriyali qotishmalarda termik ishlovning o'ziga xosligi

7xxx seriyali alyuminiy qotishmalari yuqori mustahkamlikka ega bo'lishi sababli aviatsiya va mashinasozlikda alohida ahamiyatga ega. Biroq ushbu qotishmalarda yuqori mustahkamlikka erishish bilan bir qatorda korroziyaga chidamlilik va stress-korroziya yorilishi masalalari ham muhim hisoblanadi.

2025-yilgi sharhda 7xxx seriyali qotishmalar uchun retrogressiya va qayta qaritish (RRA) usuli mikrostrukturani modifikatsiya qilish orqali yuqori mustahkamlik va korroziyaga chidamlilik o'rtasidagi muvozanatni yaxshilashga qaratilgan yondashuv sifatida ko'rib chiqilgan [15].

Bu holat termik ishlovning vazifasi faqat mustahkamlikni oshirish emas, balki materialning kompleks ekspluatatsion xususiyatlarini shakllantirishdan iborat ekanligini ko'rsatadi.

4. MUHOKAMA

O'rganilgan ilmiy manbalar alyuminiy qotishmalarining mexanik xossalarni yaxshilashda termik ishlov berishning samaradorligi bir nechta o'zaro bog'liq parametrlar bilan belgilanadi, degan xulosaga kelish imkonini beradi.

Birinchidan, eritma bilan ishlov berish harorati va davomiyligi qotishmadagi legirlovchi elementlarning matritsada qanday holatda bo'lishini belgilaydi. Ikkinchidan, sovitish tezligi keyingi qaritish jarayonining boshlang'ich sharoitini shakllantiradi. Uchinchidan, qaritish harorati va davomiyligi cho'kma fazalarning o'lchami, morfologiyasi va taqsimlanishiga ta'sir qiladi.





6082 qotishmasi bo'yicha tadqiqotlar termik ishlov usulining mexanik xossalari va mikrostrukturaga sezilarli ta'sir ko'rsatishini ko'rsatgan [8].

AA2017 bo'yicha tadqiqot esa eritma bilan ishlov berish, suv yoki havo bilan sovitish va sun'iy quritish kombinatsiyasi yakuniy mexanik xossalarning shakllanishida muhimligini ko'rsatadi [12].

AA7075 bo'yicha yangi tadqiqotlar sovitish tezligini boshqarish orqali mikrostrukturani lokal ravishda o'zgartirish va natijada qattqlik hamda mexanik xossalarning taqsimlanishini boshqarish imkoniyatlari mavjudligini ko'rsatmoqda [10].

Shu bilan birga, zamonaviy sharhlar ko'p bosqichli va nostatsionar termik ishlov texnologiyalariga qiziqish ortayotganini ko'rsatadi. Bunday yondashuvlarda qizdirish va sovitish jarayonlari, qattiq eritmaning to'yinganlik darajasi hamda cho'kma fazalar evolyutsiyasi kompleks ravishda ko'rib chiqiladi [11].

Demak, alyuminiy qotishmalarining mexanik xossalari yaxshilash uchun "eng yuqori harorat" yoki "eng uzoq quritish vaqti" kabi yagona parametrlarni tanlash emas, balki qotishma tarkibiga mos keluvchi optimal termik ishlov siklini aniqlash ilmiy jihatdan asoslangan yondashuv hisoblanadi.

5. KELGUSIDAGI TADQIQOT YO'NALISHLARI

Adabiyotlar tahlili asosida keyingi tadqiqotlarda quyidagi yo'nalishlarni o'rganish maqsadga muvofiq:

mahalliy sharoitda mavjud alyuminiy qotishmasining markasini tanlash;

eritma bilan ishlov berishning optimal harorat va vaqtini aniqlash;

sovitish muhitining mikrostrukturaga ta'sirini aniqlash;

tabiiy va sun'iy quritish rejimlarini qiyoslash;

termik ishlovdan keyingi qattqlik va mexanik mustahkamlikni aniqlash;

metallografik tahlil orqali donalar va cho'kma fazalarining o'zgarishini o'rganish;

termik ishlov parametrlarini mexanik xossalari bilan matematik-statistik bog'lash.

Mazkur yo'nalishlar kelgusida 05.02.01 — "Mashinasozlikda materialshunoslik. Quymachilik. Metallarga termik va bosim ostida ishlov berish..." ixtisosligi doirasida eksperimental tadqiqotlarni shakllantirish uchun metodologik asos bo'lishi mumkin.

6. XULOSA

Adabiyotlar tahlili natijasida alyuminiy qotishmalarining mexanik xossalari yaxshilashda termik ishlov berishning asosiy ilmiy va texnologik jihatlari umimlashtirildi.





Eritma bilan ishlov berish, sovitish va qaritish jarayonlarining oʻzaro bogʻliqligi qotishma mikrostrukturasi shakllanishida hal qiluvchi ahamiyatga ega. Ayniqsa, choʻkma fazalarning oʻlchami va taqsimlanishi dislokatsiyalar harakatiga taʼsir koʻrsatib, qattqlik va mustahkamlikning oʻzgarishini belgilaydi.

Zamonaviy tadqiqotlar termik ishlov parametrlarini oʻzgartirish orqali 6061, 6082, 2017 va 7075 kabi qotishmalarining mexanik xossalari sezilarli darajada modifikatsiya qilish mumkinligini koʻrsatmoqda [8–10,12,13]. Biroq mustahkamlikning ortishi ayrim hollarda plastiklikning kamayishi bilan kechishi sababli termik ishlov rejimini tanlashda mexanik xossalarning kompleks koʻrsatkichlarini hisobga olish zarur.

Shundan kelib chiqib, alyuminiy qotishmalarining termik ishlovini optimallashtirishning asosiy ilmiy vazifasi maksimal mustahkamlikni olish emas, balki muayyan ekspluatatsion sharoit uchun mustahkamlik, plastiklik va strukturaviy barqarorlikning maqbul nisbatini shakllantirishdan iborat.

Kelgusidagi tadqiqotlarda aniq alyuminiy qotishmasini tanlash, termik ishlov parametrlarini eksperimental asosda oʻzgartirish va mikrostrukturaviy oʻzgarishlarni mexanik xossalari bilan bogʻlash ushbu yoʻnalishdagi ilmiy tadqiqotlarning keyingi bosqichini tashkil etishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Polmear I., StJohn D., Nie J.-F., Qian M. *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2017.
2. Hatch J.E. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. ASM International, 1984.
3. Davis J.R. *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International, 1993.
4. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design*. 2014;56:862–871.
5. Totten G.E., MacKenzie D.S. *Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes*. Marcel Dekker, 2003.
6. Kumar N.M.S., Dhruthi, Pramod G.K., Samrat P., Sadashiva M. A critical review on heat treatment of aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*. 2022;58:71–79. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.586.
7. Mondolfo L.F. *Aluminum Alloys: Structure and Properties*. Butterworths, 1976.
8. Xia E., Ye T., Qiu S., Liu J., Luo J., Sun L., Wu Y. Mechanical Properties and Microstructural Evolution of 6082 Aluminum Alloy with Different Heat Treatment Methods. *Coatings*. 2024;14(5):602. DOI: 10.3390/coatings14050602.



9. Zhang R., Wang W., Jiang J. Precipitation hardening: Unravelling mechanisms of trade-off between strength and ductility/formability of Al-Mg-Si alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025;1012:178443. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.178443.
10. Scharifi E., Lotz S., Roscher M., Weidig U., et al. Functional gradation in precipitation hardenable aluminum alloy AA7075 by differential cooling strategies: Macroscopic and microscopic effects I. *Materials Science and Engineering: A*. 2025;940:148556. DOI: 10.1016/j.msea.2025.148556.
11. Feng D., Li X.-D., Zhang X.-M., Liu S.-D., Wang J.-T., Liu Y. The novel heat treatments of aluminium alloy characterized by multistage and non-isothermal routes: A review. *Journal of Central South University*. 2023;30(9):2833–2866. DOI: 10.1007/s11771-023-5439-9.
12. Effect of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of hot-rolled AA2017 aluminum alloy. *Heliyon*. 2024;10(23). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40922.
13. Kukreja T., Sharma P., Bhargava B., Dewangan S., Kumar R., Raj P., Bhatia A., et al. The bending strength and microstructure of aluminium alloy after processing through rapid/slow cooling followed by aging. *Discover Materials*. 2025;5:188. DOI: 10.1007/s43939-025-00377-6.
14. Cui L., Liu K., Chen X.-G. Recent advances in cost-effective aluminum alloys with enhanced mechanical performance for high-temperature applications: A review. *Materials & Design*. 2025;253:113869. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.113869.
15. Rodinger T., Ćorić D. Retrogression and re-aging of 7xxx series aluminum alloys: A review of microstructural changes and their influence on mechanical properties and corrosion resistance. *Materials Today Communications*. 2025;49:114456. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.114456.

