



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-30-35>
УДК 621.74. 669.715

Поступила 24.05.2022
Received 24.05.2022

УСАДОЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИЛУМИНАХ ПРИ ОБРАБОТКЕ МОДИФИКАТОРАМИ ДЛИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

А. А. АНДРУШЕВИЧ, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2. E-mail: andru49@mail.ru
М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Рассмотрено влияние различных модифицирующих добавок на усадочную пористость силуминов и герметичность отливок. Проведена сравнительная оценка модифицирования на составляющие усадки в получаемых заготовках. Установлены зависимости содержания стронция в расплаве силумина от времени выдержки расплава. Выявлена взаимосвязь уровня брака алюминиевых отливок от содержания стронция. В связи с тем что уровень брака алюминиевых отливок по причине негерметичности не имеет прямой зависимости от величины пористости в сплаве, сделано предположение, что стронций оказывает существенные изменения в механизм кристаллизации сплава и распределение микропористости в структуре сплава с формированием более развитой сети связанных между собой каналов.

Ключевые слова. Герметичность, литье, модифицирование, отливка, свойства, силумин.

Для цитирования. Андрушевич, А.А. Усадочные явления в силуминах при обработке модификаторами длительного действия / А.А. Андрушевич, М.А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 30–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-30-35>.

SHRINKAGE PHENOMENA IN SILUMINS WHEN TREATED WITH LONG-ACTING MODIFIERS

A. A. ANDRUSHEVICH, Belarusian State Agricultural Technical University, Minsk, Belarus, 99/2, Nezavisimosti ave. E-mail: andru49@mail.ru
M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru

The influence of various modifying additives on the shrinkage porosity of silumins and the tightness of castings is considered. A comparative assessment of the modification of the shrinkage components in the resulting blanks was carried out. The dependences of the strontium content in the silumin melt depending on the melt holding time are established. The relationship between the level of scrap of aluminum castings and the content of strontium has been revealed. Due to the fact that the level of rejection of aluminum castings due to leakiness does not directly depend on the porosity in the alloy, it is suggested that strontium has significant changes in the mechanism of crystallization of the alloy and the distribution of microporosity in the alloy structure with the formation of a more developed channels.

Keywords. Tightness, casting, modification, casting, properties, silumin.

For citation. Andrushevich A.A., Sadokha M.A. Shrinkage phenomena in silumins when treated with long-acting modifiers. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 30–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-30-35>.

Наиболее эффективным способом улучшения механических свойств алюминиевых литейных сплавов является модифицирование [1,2]. Механические и технологические (литейные) свойства алюминиево-кремниевых сплавов, в частности силуминов, существенно зависят от степени модифицирования эвтектики. Для этого используются в основном натрийсодержащие модификаторы. При взаимодействии с жидким алюминием образуются жидкий натрий и газообразные продукты распада. Натрий при нахождении в расплаве непосредственно влияет на процесс зародышеобразования эвтектики и морфологию образующихся кристаллов, может находиться в виде эмульсии. Натриевая эмульсия обладает низкой термической устойчивостью, что и приводит к малой длительности модифицирующего эффекта (не более 0,5 ч). Это является основным недостатком натрийсодержащих модификаторов, особенно при использовании современных технологий литья с длительной разливкой приготовленного жидкого металла. Натриевая

эмульсия быстро коагулирует, всплывает на поверхность расплава, взаимодействует с воздушной атмосферой и разлагается с образованием неметаллических включений оксида алюминия газообразного водорода [1]. Дальнейшая рафинирующая обработка лишь ослабляет модифицирующий эффект натрия.

Одним из важнейших технологических свойств алюминиевых литейных сплавов, применяемых в транспортном и сельскохозяйственном машиностроении, особенно при серийном и массовом производстве корпусных отливок, является герметичность. Герметичность – специфическое свойство литейных сплавов, определяющее способность поверхностей получаемых заготовок быть непроницаемыми для газов и жидкостей, и часто является главным фактором, от которого зависит эксплуатационная надежность литых деталей. Герметичность зависит от характера распределения усадки при затвердевании алюминиевых литейных сплавов. Основными взаимосвязанными причинами негерметичности отливок являются оксидные и неметаллические включения; усадочная и газовая пористость [3]. При изменении агрегатного состояния сплава в зависимости от химического состава и структуры, температурного интервала кристаллизации, вида и количества формирующихся фаз образуются пустоты в виде концентрированных раковин или более равномерно распределенных по объему отливки макро- и микропор. Многообразие методов повышения механических свойств и плотности литых деталей совершенно не исключает их брак по герметичности. Для получения герметичных отливок наиболее целесообразно применять силумины, близкие к эвтектическому составу, затвердевающие в узком интервале температур с образованием сосредоточенной усадочной раковины, и после их эффективной дегазации.

Решение проблемы модифицирования эвтектики алюминий-кремний сплавов с сохранением длительного действия возможно при использовании стронцийсодержащих модификаторов [4]. Стронций, как и натрий, не растворяется в силуминах из-за относительно большой разницы атомных и ионных радиусов по сравнению с алюминием. Он находится в расплаве силумина в виде микроскопических коллоидных частиц, более устойчивых в сравнении с частицами натрия, что и обуславливает длительный модифицирующий эффект [1]. Оптимальное содержание стронция для получения максимального модифицирующего эффекта по уровню достигаемых механических свойств составляет 0,05–0,06 % Sr [4]. Модифицирование металлическим стронцием силуминов усложняется его повышенной химической активностью, что привело к применению солевых флюсов или лигатур с алюминием и кремнием. В результате получения мелкокристаллической структуры, например в сплаве АК9ч, прочность и пластичность силумина существенно возрастают (в 1,5–2,0 раза) и даже при длительной выдержке превышают требования ГОСТ 2685-93 (предел прочности – 264–270 МПа, относительное удлинение – 3,4–4,0%, твердость по Бринеллю – 768–830 МПа).

Структура алюминий-кремний сплава остается полностью модифицированной в течение 5–6 ч. В отличие от натрия, который выгорает при переплаве, стронций накапливается в отливке, что может приводить в некоторых случаях к демодифицированию алюминий-кремний эвтектики. При этом процессы коагуляции ускоряются, а дисперсность составляющих эвтектики снижается. Длительное время выдержки расплава в процессе разлива приводит к его газонасыщению по тому же механизму, что и с натрием. Кроме того, при модифицировании стронцием изменяется механизм затвердевания силуминов, что приводит к изменению усадочных явлений и ухудшению литейных свойств. При этом в модифицированном силумине при затвердевании возрастает усадочная пористость [5]. Между герметичностью и прочностью алюминиевых отливок однозначная зависимость не установлена. Отмечено увеличение газовой пористости в сплавах при содержании стронция выше 0,1 % [6].

Известно, что в силуминах, модифицированных стронцием, пористость имеет газоусадочное происхождение [7]. Они затвердевают в основном с образованием концентрированной усадочной раковины, как правило, кристаллизуются последовательно от стенки формы к центру отливки с небольшим переохлаждением эвтектики, а у модифицированных возрастает доля усадочной пористости. Повышенная склонность модифицированных силуминов к образованию усадочной пористости во многом объясняется изменением механизма кристаллизации. При кристаллизации модифицированных силуминов преобладает **объемно-последовательный** механизм, когда часть расплава затвердевает последовательно, а другая основная часть в результате подавления центров кристаллизации эвтектических образований кристаллизуется по всему объему отливки с большим переохлаждением (9–12 °С).

Целью настоящего исследования являлось изучение значений составляющих усадки силуминов и образование пористости при их обработке модификаторами длительного действия.

Для определения влияния содержания стронция при модифицировании на распределение составляющих объемной усадки алюминий-кремний сплавов проведены опытно-промышленные плавки

с введением его в виде лигатур ($\text{Al}+4,0-5,5\% \text{Sr}$). Лигатуру получали путем переплава 30%-ной лигатуры (по стронцию) с алюминием А7 при температуре $850-900^\circ\text{C}$. Микроструктура лигатуры состоит из α -твердого раствора алюминия и эвтектики ($\alpha+\text{SrAl}_4$).

Сплав АК9ч (ГОСТ 2685-93) готовили в индукционной тигельной печи ИСТ-016 с графитовым тиглем по стандартной технологии плавки с модифицированием лигатурой с различным содержанием стронция (I серия – ввод $0,1\% \text{Sr}$ и II серия – ввод $0,03\% \text{Sr}$) при $740-750^\circ\text{C}$. После рафинирующей обработки препаратом «Дегазер» при температуре $720-730^\circ\text{C}$ в количестве $0,03\%$ от массы расплава и отстаивания в течение $10-15$ мин заливали в специальный кокиль и получали конусную пробу для анализа усадочных процессов (по Татуру) (рис. 1).

В обоих случаях модифицирующая обработка стронцием улучшала жидкотекучесть силумина на $15-20\%$, балл пористости практически не изменялся ($0-1$), а плотность сплава уменьшалась незначительно.

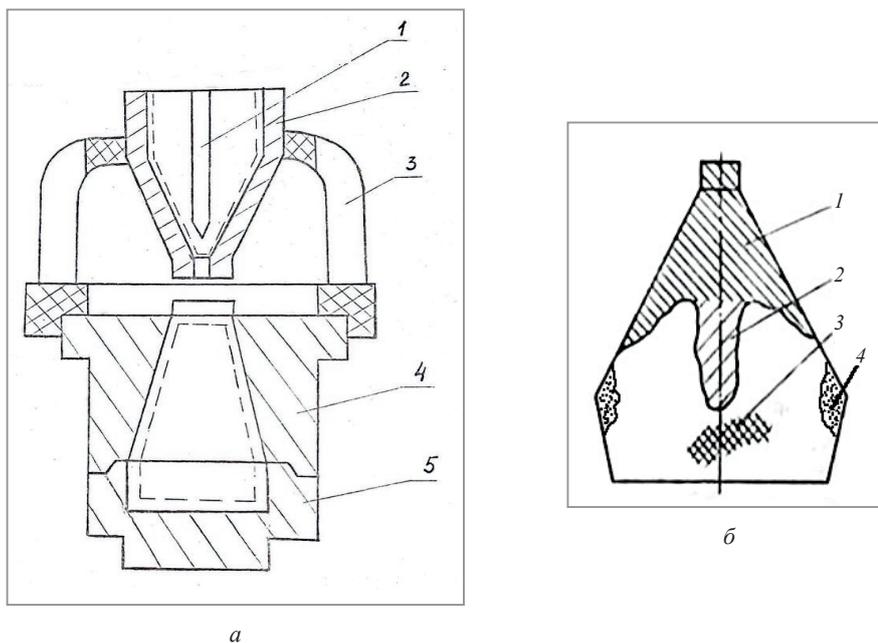


Рис. 1. Исследование пористости (по Татуру):

a – кокиль для заливки пробы (1 – стержень; 2 – чаша; 3 – оправка; 4 – верхняя полуформа; 5 – нижняя полуформа);
б – залитая проба (1 – усадочная пористость; 2 – макроусадочная раковина; 3 – микроусадочная пористость; 4 – внешняя усадка)

Определяли концентрированную усадочную пористость, микроусадочную рассеянную пористость, наружную усадку и суммарную объемную усадку в зависимости от времени выдержки расплава. Эксперименты показали, что одновременно с уменьшением содержания стронция в результате его угара (рис. 2) происходит неодинаковое изменение составляющих характеристик усадки.

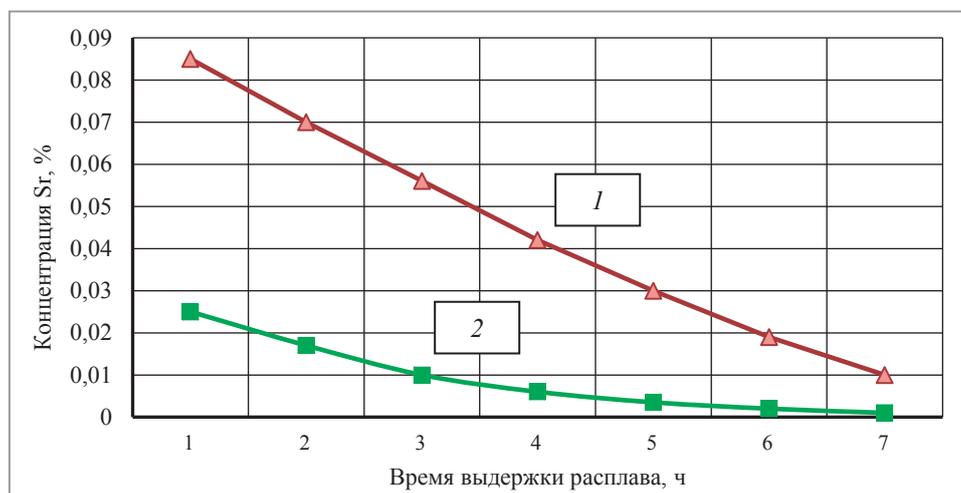
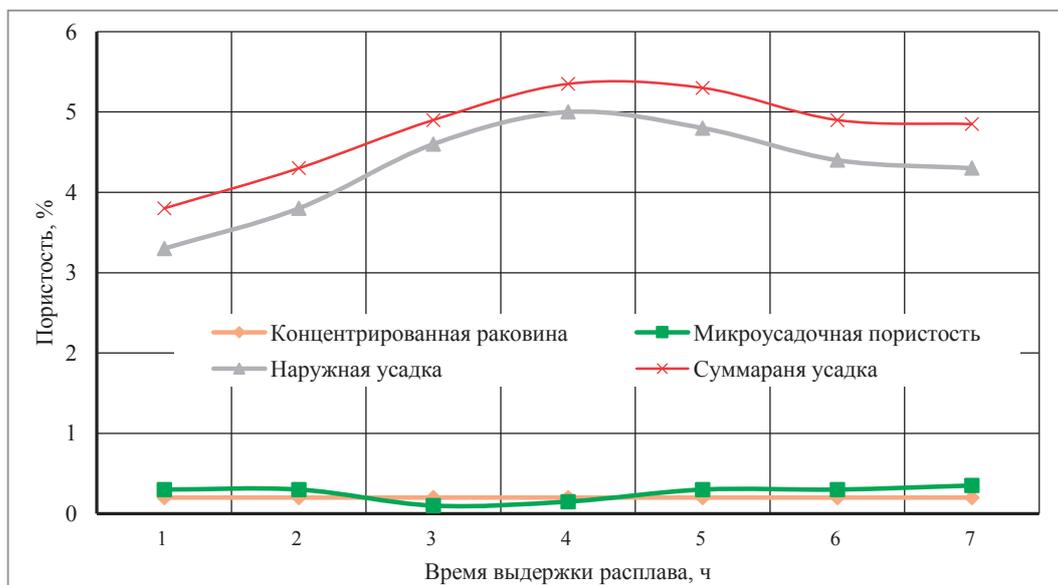


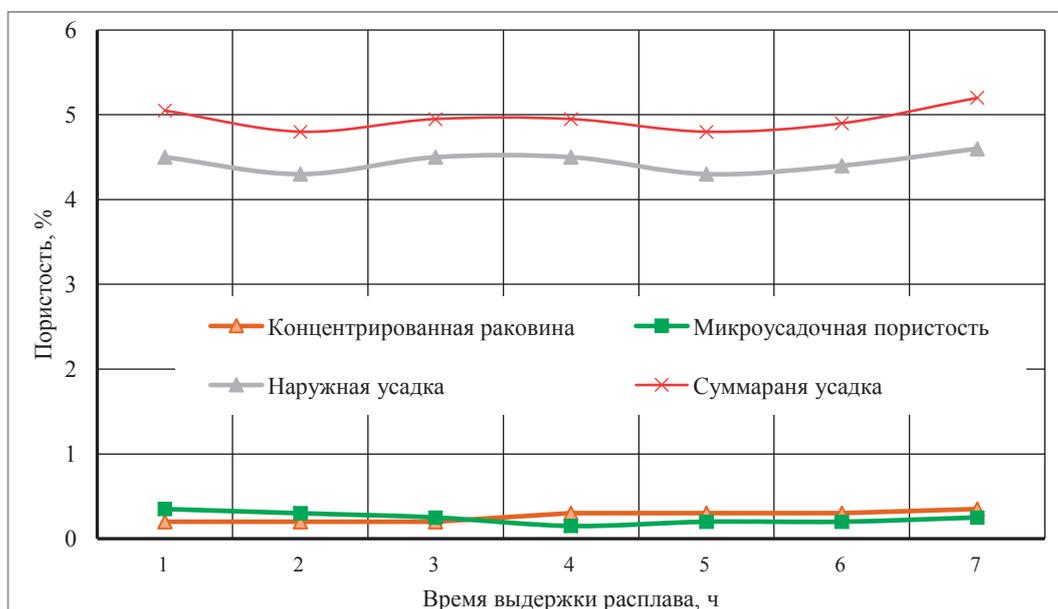
Рис. 2. Изменение содержания стронция в сплаве АК9ч в зависимости от времени выдержки расплава:
 1 – исходная концентрация $0,1\%$; 2 – исходная концентрация $0,03\%$

При повышенном содержании стронция (рис. 3, а, I серия) величина концентрированной усадочной раковины увеличивается незначительно (0,4–0,6%), микроусадочная пористость изменяется в пределах 0,2–0,9%, наружная усадка возрастает в 1,3 раза. После 5 ч выдержки сплава содержание стронция уменьшается на 0,03%. В дальнейшем при кристаллизации такого сплава суммарная объемная усадка возрастает до 5,4% (при 3,9% исходного сплава).

При введении в расплав 0,03% стронция (рис. 3, б, II серия) значения концентрированной усадочной раковины, микроусадочной пористости, наружной усадки изменяются незначительно (в пределах 0,1–0,3%). Величина суммарной объемной усадки составляет 4,8–5,2%.



а



б

Рис. 3. Влияние времени отстаивания расплава на составляющие усадки модифицированного сплава АК9ч:

а – при повышенном содержании стронция (исходный ввод – 0,1%);

б – при пониженном содержании стронция (исходный ввод – 0,03%)

Из рисунка видно, что независимо от содержания стронция в сплаве с его уменьшением при выдержке расплава объемы концентрированной раковины и наружной усадки возрастают незначительно, объем микроусадочной рассеянной пористости увеличивается в 2–3 раза. Суммарная объемная усадка при модифицировании оптимальным содержанием стронция приводит к уменьшению ее значения на 10–15%, что характерно для модифицированного силумина с плоским фронтом процесса затвердевания при последовательной кристаллизации [6]. Жидкотекучесть силуминов при этом изменяется незначительно.

Данные изменения в процессе кристаллизации сплава при обработке стронцием косвенно подтверждаются и результатами испытания отливок на герметичность. Обработка расплава стронцийсодержащими лигатурами и повышение содержания стронция в расплаве при минимальном влиянии на общую усадку и пористость оказывают существенное влияние на герметичность производимых отливок (рис. 4). Например, гидроиспытания на герметичность корпусных отливок из сплава АК9ч с модифицированием стронциевой лигатурой выявили такую особенность, что свидетельствует о существенном изменении механизма кристаллизации сплава и распределении микропористости в структуре сплава. При этом формируется более развитая сеть связанных между собой каналов.

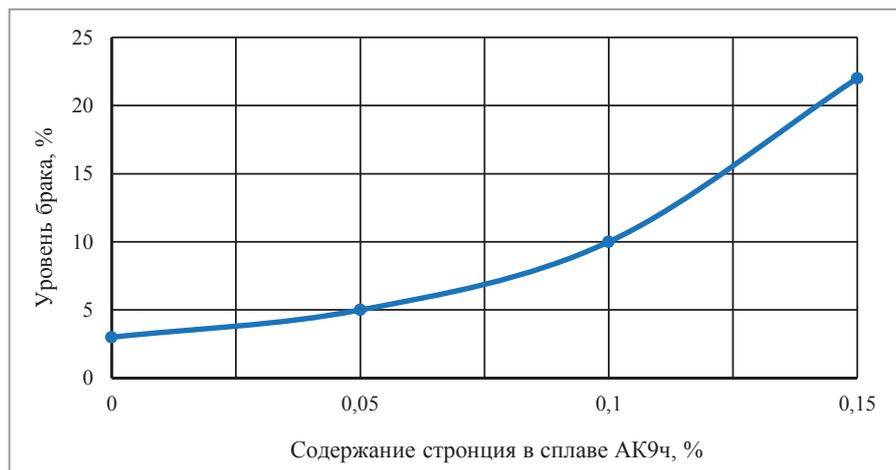


Рис. 4. Влияние содержания стронция на уровень брака алюминиевых отливок по герметичности

По данным ряда исследований, отливки с микроусадочной пористостью менее 0,5% относятся к высококачественным, а при пористости более 1,0% их следует признавать негодными [8]. Полученные результаты показали, что это может привести к значительному снижению герметичности алюминиевых отливок из силуминов.

Выводы

Применение модификаторов длительного действия позволяет получить модифицирующий эффект, сохраняющийся до 5–6 ч, что обеспечивает стабильные повышенные механические свойства алюминиево-кремниевых сплавов.

Изменение характера затвердевания модифицированных силуминов приводит к увеличению рассредоточенной микроусадочной пористости без существенного увеличения величины суммарной объемной усадки.

Полученные результаты следует учитывать в литейных цехах и на участках при производстве алюминиевого герметичного литья с использованием модификаторов длительного действия для обеспечения повышенных механических, эксплуатационных и технологических свойств корпусных деталей из силуминов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Проблема модифицирования алюминиево-кремниевых эвтектик и силуминов // *Литье и металлургия*. 2018. № 2. С. 12–15.
2. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
3. **Постников Н. С.** Высокогерметичные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1972. 180 с.
4. **Вахобов А. В., Ганиев И. Н.** Стронций – эффективный модификатор силуминов // *Литейное производство*. 2000. № 5. С. 28–29.
5. **Задруцкий С. П., Немененок Б. М., Королев С. П. и др.** Рафинирование и модифицирование алюминиевых сплавов // *Литейное производство*. 1994. № 3. С. 17–20.
6. **Абрамов А. А. и др.** Опыт модифицирования литейных алюминиевых сплавов стронцием. Л.: ЛДНТП, 1987. 28 с.
7. **Немененок Б. М.** Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. Мн.: Технопринт, 1999. 272 с.
8. **Arbenz H.** Qualitätsbeschreibung von Alumium-Gubstucken anhand von Gefugemerkmale // *Giesserei*. 1979. B.66. No 19. S. 702–711.

REFERENCES

1. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Problema modifitsirovaniya aljuminievo-kremnievyh jevtektik i siluminov [The problem of modifying aluminum-silicon eutectics and silumins]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 2, pp. 12–15.

2. **Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu.** *Modificirovanie splavov* [Alloy Modification]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 192 p.
3. **Postnikov N.S.** *Vysokogermetichnye aljuminievye splavy* [Highly sealed aluminum alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 180 p.
4. **Vahobov A.V., Ganiev I.N.** Stroncij – jeffektivnyj modifikator siluminov [Strontium is an effective silumin modifier]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2000, no. 5, pp. 28–29.
5. **Zadruckij S.P., Nemenenok B.M., Korolev S.P.** Rafinirovanie i modificirovanie aljuminievyh splavov [Refining and modification of aluminum alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1994, no.3, pp. 17–20.
6. **Abramov A.A.** *Opyt modificirovanija litejnyh aljuminievyh splavov stronciem* [Experience in modifying cast aluminum alloys with strontium]. Leningrad, LDNTP Publ., 1987, 28 p.
7. **Nemenenok B.M.** *Teorija i praktika kompleksnogo modificirovanija siluminov* [Theory and practice of complex modification of silumins]. Minsk, Tehnoprnt Publ., 1999, 272 p.
8. **Arbenz H.** Qualitätsbeschreibung von Alumium-Gubstucken anhand von Gefugemerkmalen. *Giesserei*, 1979, vol. 66, no. 19, pp. 702–711.