



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-19-24>
УДК 621.745.35

Поступила 06.12.2021
Received 06.12.2021

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: stetsenko.52@bk.ru
А. В. СТЕЦЕНКО, МОУВО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

Исследована классическая теория кристаллизации металлических расплавов. Показано, что она не соответствует второму закону термодинамики. На основании термодинамического анализа установлено, что классическая теория кристаллизации металлических расплавов очень проблематична. Для решения теоретических проблем необходимо считать, что кристаллизация металлических расплавов является в основном равновесным процессом, в котором основную роль играют нанокристаллы.

Ключевые слова. Металлический расплав, кристаллизация, энергия Гиббса, термодинамика, нанокристаллы, кластеры, кристаллы, центры кристаллизации.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Современное состояние теории кристаллизации металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 19–24. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-19-24>.

CURRENT STATE OF METAL MELT CRYSTALLIZATION THEORY

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru
A. V. STETSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

The classical theory of crystallization of metal melts has been investigated. It is shown that it does not correspond to the second law of thermodynamics. Based on thermodynamic analysis, it was found that the classical theory of crystallization of metal melts is very problematic. To solve theoretical problems, it must be considered that the crystallization of metal melts is mainly an equilibrium process in which nanocrystals play a major role.

Keywords. Metal melt, crystallization, Gibbs energy, thermodynamics, nanocrystals, clusters, crystals, crystallization centers.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Current state of metal melt crystallization theory. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 1, pp. 19–24. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-19-24>.

Классическая теория кристаллизации металлических расплавов (КТК), признанная современным мировым сообществом, была создана в первой половине прошлого столетия в основном благодаря трудам Г. Таммана, В. И. Данилова и Я. И. Френкеля [1–3]. Далее КТК вошла в учебные пособия (учебники) для высших учебных технических заведений без существенных изменений [4–16]. Это означает, что основные положения КТК являются фундаментальными для металловедения и теории литейных процессов. Они во многом определяют направление технического прогресса, который существенно зависит от свойств металлопродукции. Поэтому исследование КТК, решение ее проблем является актуальной задачей.

Аксиомой КТК служит утверждение, что кристаллизация металлических расплавов является неравновесным термодинамическим процессом, происходящим при температуре ниже равновесной (T_0). Поэтому во всех учебниках по металловедению и теории литейных процессов приводится график зависимости молярной объемной энергии Гиббса (G_V) металлов от температуры (рис. 1). При этом термодинамические расчеты молярных объемных энергий Гиббса твердой (G_T^S) и жидкой (G_T^L) фаз в литературных источниках не приводятся [2, 4–16].

Основным параметром КТК является переохлаждение (ΔT), которое равно разности между равновесной и неравновесной (T_C) температурами кристаллизации (рис. 1). Величина ΔT определяется

экспериментально по температурно-временной кривой охлаждения металлического расплава в литейной форме [10–14].

Согласно КТК, основными структурными элементами металлического расплава и процесса формирования кристаллов служат атомы. Из них при $T > T_0$, случайным образом, статистически образуются гипотетические неравновесные кластеры, имеющие ближний порядок расположения атомов. Принято считать, что кластеры возникают и распадаются с частотой $10^7\text{--}10^{11} \text{ с}^{-1}$ [17, 18]. Поэтому они не имеют граничной энергии. Следовательно, металлический расплав является однофазной системой, а его кристаллизация – атомно-структурным процессом.

Согласно КТК, при $T < T_0$ в металлическом расплаве кластеры по непонятному механизму превращаются в нанокристаллические зародыши. Энергия Гиббса образования такого зародыша (ΔG) радиуса r определяется следующим уравнением:

$$\Delta G = \frac{\rho}{M} \Delta G_V \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 + \sigma 4\pi r^2, \quad (1)$$

где ΔG_V – изменение молярной объемной энергии Гиббса при формировании зародыша; ρ – плотность твердой фазы; M – молярная масса зародыша; σ – удельная граничная энергия. ΔG_V определяется по уравнению [8]:

$$\Delta G_V = - \frac{L\Delta T}{T_0}, \quad (2)$$

где L – молярная теплота кристаллизации.

Согласно КТК, $\sigma = \text{const}$. Тогда уравнение (1) после подстановки в него уравнения (2) будет иметь экстремум. Он соответствует радиусу критического зародыша ($r_{\text{кз}}$):

$$r_{\text{кз}} = \frac{2\sigma T_0 M}{L\Delta T \rho}. \quad (3)$$

Расти будут зародыши с $r > r_{\text{кз}}$. В этом случае они являются центрами кристаллизации (ЦК).

Согласно КТК, ЦК при затвердевании отливок служат неметаллические включения (НМВ) или интерметаллиды, устойчивые в металлических расплавах. Это положение является фундаментальным для классической теории модифицирования сплавов.

Согласно КТК, рост кристаллов происходит путем образования в расплаве двумерных критических зародышей, их осаждения на гранях кристаллов с последующим присоединением к этим зародышам единичных атомов. Поэтому скорость роста кристаллов будет зависеть от диффузии атомов и величины ΔT [8].

Проблемы КТК

1. Согласно КТК, изменение энергии Гиббса при кристаллизации должно быть меньше нуля, что не соответствует второму закону термодинамики. Из него следует, что любой процесс термодинамически возможен, если изменение энергии Гиббса этого процесса ($\Delta G_{\text{п}}$) меньше или равно нулю [19]. Условие $\Delta G_{\text{п}} < 0$ справедливо для необратимых процессов, а $\Delta G_{\text{п}} = 0$ – для обратимых процессов. Кристаллизация является обратимым процессом.

2. Согласно КТК, изменение молярной объемной энергии Гиббса при охлаждении металлического расплава будет больше нуля (рис. 1). В этом случае, согласно второму закону термодинамики, такой процесс термодинамически невозможен [19]. Но процессы нагрева и охлаждения металлического расплава не только реальны, но и обратимы.

3. Согласно КТК, кристаллизация жидких металлов является неравновесным процессом. Но

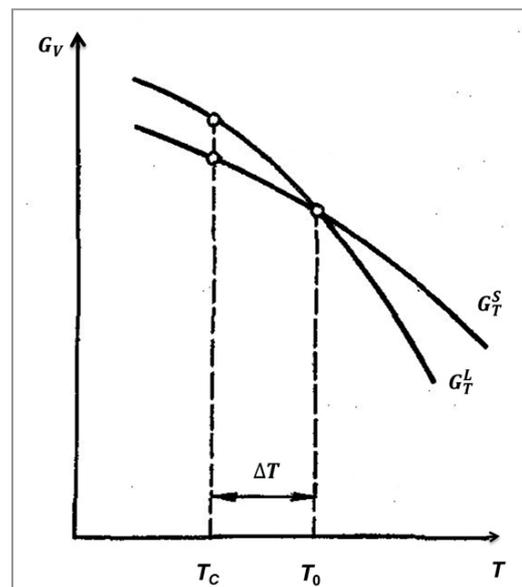


Рис. 1. Зависимость молярной объемной энергии Гиббса твердой и жидкой фаз от температуры согласно классической теории кристаллизации металлических расплавов

он происходит при постоянной температуре. В этом случае справедливо правило фаз, которое соответствует термодинамически равновесному процессу.

4. Согласно КТК, в процессе кристаллизации металлических расплавов $\sigma = \text{const}$. Но термодинамические расчеты свидетельствуют, что при кристаллизации металлов σ прямо пропорциональна радиусу зародыша (ЦК) [20]. В этом случае уравнение (1) не будет иметь экстремума.

5. Согласно КТК, ЦК реально являются НМВ или интерметаллиды. Но для этого они должны соответствовать принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского. Согласно этому принципу, кристаллические решетки НМВ или интерметаллидов и кристаллизующихся фаз обязаны быть одинаковыми, а по соответствующим параметрам отличие не должно превышать 9% [4, 12]. Установлено, что «зародышеобразующие» НМВ или интерметаллиды не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского при кристаллизации силуминов [21, 22].

6. Согласно КТК, металлический расплав является атомно-структурной системой, основными элементами процесса кристаллизации служат атомы. Но удельная теплота плавления металлов в среднем составляет всего 4% от их удельной теплоты сублимации, которая равна удельной теплоте атомизации [20]. Это означает, что металлический расплав в среднем состоит только на 4% из атомов. Поэтому они не могут быть основными структурными элементами металлического расплава и процесса его кристаллизации.

7. Согласно КТК, скорость роста кристаллов зависит от флуктуационного процесса образования двумерных критических зародышей и диффузии атомов. Но гомогенное формирование таких зародышей, как и трехмерных, связано, согласно КТК, с большими переохлаждениями, которые при затвердевании отливок не фиксируются. Что касается атомных диффузионных процессов, то они кинетически не соответствуют высоким скоростям процесса кристаллизации [23].

Решение проблем

Расчетные зависимости молярной объемной энергии Гиббса от температуры для металлов существенно отличаются от классической, представленной на рис. 1 [24]. Примером служит график $G_V = f(T)$ для алюминия (рис. 2). Сравнивая рис. 1 и 2, легко видеть, что зависимость $G_V = f(T)$, которая лежит в основе КТК, не только гипотетическая, но и ошибочная. Из рис. 2 следует, что при охлаждении металла $\Delta G_V > 0$. Это означает, что график $G_V = f(T)$ отражает термодинамику процессов нагрева и охлаждения металлов лишь частично, без учета зависимости молярной граничной энергии (G_B) от температуры. Поскольку эти процессы обратимы, то справедливо уравнение [25]:

$$G_B = -G_V. \quad (4)$$

Используя уравнение (4), зная зависимость $G_V = f(T)$, можно построить график $G_B = f(T)$. Эти графики будут симметричны относительно оси абсцисс [25]. Поэтому при охлаждении металла $\Delta G_B < 0$ и справедливо следующее уравнение:

$$\Delta G_V + \Delta G_B = 0. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что кристаллизация металлического расплава является равновесным процессом. Это подтверждают термодинамические расчеты процесса кристаллизации металлов [20].

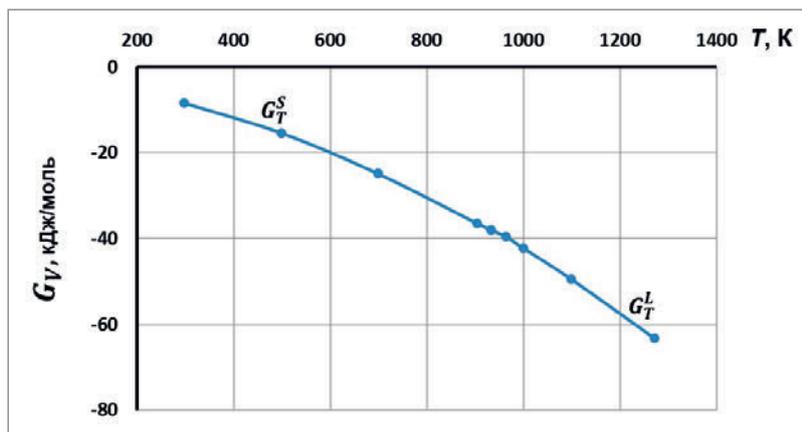


Рис. 2. Зависимость молярной объемной энергии Гиббса алюминия от температуры согласно термодинамическим расчетам

При нагреве металлического расплава происходит увеличение G_B , а при его охлаждении – уменьшение G_B . Это свидетельствует о том, что металлический расплав в основном состоит из нанокристаллов, что подтверждается термодинамическими расчетами [20, 26]. Существование нанокристаллов в металлических расплавах экспериментально подтверждено методом малоуглового рассеяния нейтронов [27–29]. Поэтому кристаллизацию металлических расплавов можно считать наноструктурным процессом и выразить следующим образом. Сначала из элементарных нанокристаллов формируются структурообразующие нанокристаллы. Затем из них образуется ЦК. Далее из него и структурообразующих нанокристаллов формируется дендритный микрокристалл [30].

Наноструктурная кристаллизация металлических расплавов является равновесным термодинамическим процессом, в котором основными элементами для формирования микрокристаллов служат не атомы, а нанокристаллы. При этом ЦК служит компактный комплекс из структурообразующих нанокристаллов, который соответствует принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского.

Термодинамические расчеты показывают, что при равновесной кристаллизации металлов σ пропорциональна радиусу кривизны элементов кристаллов [20]. Это существенно меняет классическое представление о процессах кристаллизации металлических расплавов. Вместо атомно-структурных эти процессы становятся наноструктурными [30].

Поскольку металлический расплав является двухфазной системой, состоящей из нанокристаллов и свободных атомов, то с учетом лапласовского давления будет выполняться правило фаз:

$$P = C - F + 2, \quad (6)$$

где P – число фаз; C – количество компонентов; F – число степеней свободы. Правило фаз выполняется при наноструктурной кристаллизации металлов, что подтверждает равновесность этого процесса.

Уменьшение равновесной температуры кристаллизации металла на ΔT_0 при уменьшении радиуса микрокристалла (r_m) до радиуса структурообразующего нанокристалла (r_i) определяется уравнением Томсона [32]:

$$\Delta T = \frac{2\sigma M T_m}{r_n L \rho}, \quad (7)$$

где T_m – температура плавления металла, равная T_0 . При этом $r_m \gg r_n$.

Высокая скорость роста кристаллов при кристаллизации металлического расплава объясняется диффузией структурообразующих нанокристаллов, которая значительно больше атомной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tamman G. Kristallizieren and Schmelzen. Leipzig, 1903. 188 p.
2. Данилов В. И. Строение и кристаллизация жидкостей. Киев: АН УССР, 1956. 566 с.
3. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. М.: АН СССР, 1945. 490 с.
4. Уманский Я. С., Финкельштейн Б. Н., Блантер М. Е. и др. Физические основы металловедения. М.: Металлургиздат, 1955. 721 с.
5. Штейнберг С. С. Металловедение. М: Металлургиздат, 1961. 598 с.
6. Бунин К. П., Баранов А. А. Металлография. М.: Металлургия, 1970. 254 с.
7. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. Кристаллизация в литейной форме. М.: Машиностроение, 1973. 288 с.
8. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. Л.: Машиностроение, 1976. 216 с.
9. Куманин И. Б. Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.
10. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
11. Лившиц Б. Г. Металлография. М.: Металлургия, 1990. 236 с.
12. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
13. Мозберг Р. К. Материаловедение. М.: Высш. шк., 1991. 448 с.
14. Фетисов Г. П., Карпман М. Г., Матюнин В. М. и др. Материаловедение и технология металлов. М.: Высш. шк., 2005. 862 с.
15. Новиков И. И., Золоторевский В. С., Портной В. К. и др. Материаловедение / Под. ред В. С. Золоторевского. М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. 496 с.
16. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение / Под. ред. Ю. П. Солнцева. СПб: ХИМИЗДАТ, 2017. 784 с.
17. Ершов Г. С., Бычков Ю. Б. Высокопрочные алюминиевые сплавы из вторичного сырья. М.: Металлургия, 1979. 192 с.
18. Бродова И. Г., Попель П. С., Барбин Н. М. и др. Исходные расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 369 с.
19. Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А. Физическая химия. М.: Металлургия, 1968. 520 с.
20. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Термодинамические основы кристаллизации металлов // Литье и металлургия. 2020. № 2. С. 8–11.

21. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
22. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Научная проблема модифицирования первичных кристаллов α -фазы отливок из силумина. Пути решения // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 28–31.
23. Гаврилин И. В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. Владимир: Владим. гос. ун-т, 2000. 260 с.
24. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Термодинамика твердых и жидких металлов // Металлургия машиностроения. 2021. № 6. С. 31–33.
25. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Термодинамика твердого и жидкого алюминия // Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 74–77.
26. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Структура металлического расплава // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 18–20.
27. Dahlborg U., Besser M., Calvo-Dahlborg M. et al. Structure of molten Al–Si alloys // Journal of Non-Crystalline Solids. 2007. Vol. 353. P. 3005–3010.
28. Dahlborg U., Kramer M. J., Besser M. et al. Structure of molten Al and eutectic Al–Si alloy studied by neutron diffraction // Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. Vol. 361. P. 63–69.
29. Calvo-Dahlborg M., Popel P. S., Kramer M. J. et al. Superheat-dependent microstructure of molten Al–Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering // Journal of Alloys and Compounds. 2013. Vol. 550. P. 9–22.
30. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация металлов // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 23–26.
31. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Термодинамические основы плавления металлов // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 14–17.
32. Русанов А. И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. Л.: Химия, 1967. 392 с.

REFERENCES

1. Tamman G. *Kristallisieren und Schmelzen*. Leipzig, 1903, 188 p.
2. Danilov V. I. *Stroenie i kristallizaciya zhidkостей* [Structure and crystallization of liquids]. Kiev, AN USSR Publ., 1956. 566 p.
3. Frenkel' Ya. I. *Kineticheskaya teoriya zhidkостей* [Kinetic theory of liquids]. Moscow, AN SSSR Publ., 1945. 490 p.
4. Umanskij Ya. S., Finkel'shtejn B. N., Blanter M. E. i dr. *Fizicheskie osnovy metallovedeniya* [Physical bases of metal science]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1955. 721 p.
5. Shtejnberg S. S. *Metallovedenie* [Metallurgical Science]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961. 598 p.
6. Bunin K. P., Baranov A. A. *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 254 p.
7. Balandin G. F. *Formirovanie kristallicheskogo stroeniya otlivok. Kristallizaciya v litejnoj forme* [Formation of crystal structure of castings. Crystallization in Mold]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 288 p.
8. Gulyaev B. B. *Teoriya litejnyh processov* [Theory of Casting Processes]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 216 p.
9. Kumanin I. B. *Voprosy teorii litejnyh processov. Formirovanie otlivok v processe zatverdevaniya i ohlazhdeniya splava* [Questions of the theory of casting processes. Formation of castings during solidification and cooling of alloy]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 216 p.
10. Gulyaev A. P. *Metallovedenie* [Metallurgical Science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p.
11. Livshic B. G. *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 236 p.
12. Lahtin Yu. M., Leont'eva V. P. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 528 p.
13. Mozberg R. K. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 448 p.
14. Fetisov G. P., Karpman M. G., Matyunin V. M. i dr. *Materialovedenie i tekhnologiya metallov* [Materials science and technology of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 862 p.
15. Novikov I. I., Zolotarevskij V. S., Portnoj V. K. i dr. *Materialovedenie* [Materials Science]. Pod. red V. S. Zolotarevskogo. Moscow, Izdatel'skiy Dom MISiS Publ., 2009. 496 p.
16. Solncev Yu. P., Pryahin E. I. *Materialovedenie* [Materials Science]. Pod. red. YU. P. Solnceva. Saint Petersburg, Himizdat Publ., 2017. 784 p.
17. Ershov G. S., Bychkov Yu. B. *Vysokoprochnye alyuminievye splavy iz vtorichnogo syr'ya* [High-strength aluminum alloys from secondary raw materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 192 p.
18. Brodova I. G., Popel' P. S., Barbin N. M. i dr. *Iskhodnye rasplavy kak osnova formirovaniya struktury i svojstv alyuminievyyh splavov* [Initial melts as basis for formation of structure and properties of aluminium alloys]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2005. 369 p.
19. Zhuhovickij A. A., Shvarcman L. A. *Fizicheskaya himiya* [Physical Chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 520 p.
20. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Termodinamicheskie osnovy kristallizacii metallov* [Thermodynamic foundations of metal crystallization]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 2, pp. 8–11.
21. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Modifitsirovanie splavov* [Alloy modification]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2009. 192 p.
22. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Nauchnaya problema modifitsirovaniya pervichnykh kristallov α -fazy otlivok iz silumina. Puti resheniya* [The scientific problem of modifying the primary crystals of the α -phase of silumin castings. Solution Paths]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 28–31.
23. Gavrilin I. V. *Plavlenie i kristallizaciya metallov i splavov* [Melting and crystallization of metals and alloys]. Vladimir, Vladim. gos. un-t Publ., 2000, 260 p.
24. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Termodinamika tverdyh i zhidkih metallov* [Thermodynamics of solid and liquid metals]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2021, no. 6, pp. 31–33.
25. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Termodinamika tverdogo i zhidkogo alyuminiya* [Thermodynamics of solid and liquid aluminium]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 74–77.
26. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Struktura metallicheseskogo raspplava* [Metal melt structure]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 18–20.
27. Dahlborg U., Besser M., Calvo-Dahlborg M. et al. Structure of molten Al–Si alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, vol. 353, pp. 3005–3010.

28. **Dahlborg U., Kramer M.J., Besser M. et al.** Structure of molten Al and eutectic Al–Si alloy studied by neutron diffraction. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, vol. 361, pp. 63–69.
29. **Calvo-Dahlborg M., Popel P.S., Kramer M.J. et al.** Superheat-dependent microstructure of molten Al–Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 550, pp. 9–22.
30. **Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stecenko A.V.** Nanostrukturnaya kristallizatsiya metallov [Nanostructured crystallization of metals]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
31. **Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu.** Termodinamicheskie osnovy plavleniya metallov [Thermodynamic bases of metals melting]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 14–17.
32. **Rusanov A.I.** *Fazovye ravnovesiya i poverhnostnye yavleniya* [Phase equilibrium and surface phenomena]. Leningrad, Himiya Publ., 1967. 392 p.

Поздравляем!

с избранием академиком НАН Беларуси

Виктора Яковлевича ПРУШАКА

*Д-ра техн. наук, профессора, лауреата Госпремии Республики Беларусь,
члена редколлегии журнала «Литье и металлургия»,
технического директора ЗАО «Солигорский институт проблем
ресурсосбережения с опытным производством».*

*Желаем дальнейших творческих успехов,
крепкого здоровья, благополучия в жизни!*

*Редакция журнала «Литье и металлургия»
Ассоциация литейщиков и металлургов*