DOI: 10.24892/RIJIE/20250309

Компьютерное моделирование и исследование процесса кристаллизации расплава в литейно-прокатном блоке совмещенного процесса «литье-прокатка-РКУП»*

Панин Е.А.
НАО «Карагандинский индустриальный университет»
г Темиртау, Республика Казахстан
Cooper802@mail.ru

Куис Д.В.
Белорусский государственный технологический университет
г. Минск, Республика Беларусь
dmitrykuis@mail.ru

Лежнев С.Н.
НАО «Рудненский индустриальный университет»
г. Рудный, Республика Казахстан
Sergey_legnev@mail.ru

Арбуз А.С.
АО «Назарбаев университет»
г. Астана, Республика Казахстан
zubra_kz@mail.ru

Аннотация. **Использование совмещенных процессов, объединяющих литье и обработку давлением, при получении различной металлопродукции является одним из эффективных путей комплексного решения задач по повышению качества впускаемой металлопродукции и технологичности производства, а также снижению материальных затрат и энергозатрат. В данной работе было проведено компьютерное моделирование и изучение процесса кристаллизации алюминиевого сплава АД31 в валковом кристаллизаторе, как начальной стадии (получение исходной заготовки сечением 20×20 мм) нового совмещенного процесса деформирования «литье-прокатка-РКУП» с использованием программы «Полигон-Софт». Анализ полученной модели показал, что за счет малого сечения заготовки на выходе из кристаллизатора происходит полное затвердевание расплава. Варьирование значениями скорости вращения сегментов кристаллизатора, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения от базового значения 30 об/мин показало, что при всех скоростях на расстоянии 200 мм от выхода из кристаллизатора в сечении заготовки полностью отсутствует жидкая фаза сплава.**

Ключевые слова: **совмещенный процесс «литье-прокатка-РКУП», моделирование, жидкая фаза, кристаллизация, поле температур.**

Введение

Одной из основных тенденций современного этапа развития черной и цветной металлургии является повышение качества выпускаемой металлопродукцией, что напрямую связано с непрерывным ужесточением требований, предъявляемых потребителями к характеристикам данной металлопродукции. В настоящее время существует целый ряд способов повышения качества металлопродукции на различных стадиях ее получения: выплавке; в процессе внепечной обработки; разливки; обработки давлением; термической обработки.

Если говорить об такой стадии получения металлопродукции, как обработка давлением, то для этой стадии уже давно доказано, что одним из эффективных способов повышения качества различного ассортимента металлопродукции из черных и цветных металлов и сплавов является совершенствование ее структурного состояния, в частности измельчение зерна до ультрамелкозернистого состояния. Но повышение качества металлопродукции из черных и цветных металлов и сплавов в процессе получения ее различными способами обработки давлением является не единственно задачей предприятий, выпускающих металлопродукцию. Также данные предприятия уделяют большое значение вопросам повышения технологичности производства, снижения материальных затрат и энергозатрат. Только комплексное решение этих задач позволит добиться повышения конкурентоспособности любого промышленного предприятия, специализирующего на выпуске металлопродукции.

В последние годы при производстве различной сортопрокатной продукции и проволоки проявляется тенденция разработки так называемых, «совмещенных» процессов обработки различных металлов и сплавов, которые представляют собой сочетание двух и более обычных процессов деформирования. Именно использование совмещенных процессов при получении металлопродукции в виде сортового проката различного назначения и проволоки является одним из эффективных путей комплексного решения выше указанных задач по повышению качества впускаемой металлопродукции и технологичности производства, а также снижению материальных затрат и энергозатрат.

За последние два десятилетия разработан целый ряд совмещенных способов обработки давлением, как цветных, так и черных металлов и сплавов, позволяющих получать высококачественную металлопродукцию различного назначения [1-14]. При этом хочется отметить, что при создании совмещенных процессов возможно не толь-

* Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23485709). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

ко сочетание двух и более обычных процессов деформирования, но и совмещение процесса литья и нескольких процессов обработки материала давлением. В этом случае наиболее известным методом является совмещенный процесс литья, прокатки и прессования [15-19]. В данном процессе металл в жидком состоянии подается к охлаждаемым прокатным валкам, выполняющим роль кристаллизатора. При контакте с валками металл затвердевает, прокатывается и выпрессовывается через матрицу.

С целью решения задачи по повышению качества металлопродукции и технологичности производства, а также снижению материальных затрат и энергозатрат нами был предложен новый совмещенный процесс «литье-прокатка-РКУП» (рис.1). В основу разрабатываемого нового совмещенного процесса лег ранее разработанный нами совмещенный процесс «прокатка-РКУП» [20], который имеет различные модификации. Предложенный совмещенный процесс деформирования имеет принципиальное отличие от ранее исследованного совмещенный процесс «прокатка-РКУП» [20], поскольку в нем на начальной стадии заготовка находится в жидком агрегатном состоянии. При разливке в валковый кристаллизатор происходит остывание жидкого расплава, что приводит к кристаллизации и затвердеванию расплава.

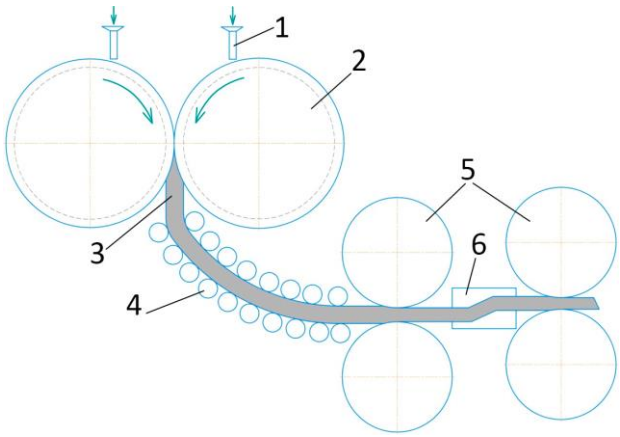

Рис. 1. Принципиальная схема совмещенного процесса «литье-прокатка-РКУП»:
1 – сопла для разливки расплава, 2 – валковый кристаллизатор, 3 – заготовка, 4 – охлаждающие ролики, 5 – прокатные валки, 6 – матрица для РКУП

Целью данной работы является компьютерное моделирование и изучение процесса кристаллизации расплава в литейно-прокатном блоке совмещенного процесса «литье-прокатка-РКУП».

Материалы и методы

Для моделирования процесса кристаллизации жидкого расплава была использована программа «Полигон-Софт» [21, 22]. В качестве конечного параметра было принято конечное сечение заготовки равное 20×20 мм. Для получения заготовки заданного сечения необходимо обеспечить соответствующую конструкцию выходного окна кристаллизатора, который был выполнен в виде бочки калиброванного валка.

Импортирование моделей в формате STL проводится в модуль «Мастер», где ведется основной расчет. Подача жидкого расплава будет осуществляться сквозь конусные воронки сверху каждого сегмента кристаллизатора. На рис. 2 представлена готовая трехмерная модель кристаллизатора в расчетном модуле. В качестве материала расплава будет использоваться алюминиевый сплав АД31. Ключевым параметром кристаллизации любого материала является температура солидуса, т.е. температура, при которой материал начинает плавиться при нагреве, либо затвердевать при охлаждении. Для данного сплава такое значение температуры равно 650°С. В ходе процесса затвердевания расплава сегменты валкового кристаллизатора вращаются навстречу друг другу, получая при этом активное внутреннее охлаждение. Скорость вращения сегментов была задана равной 30 об/мин.

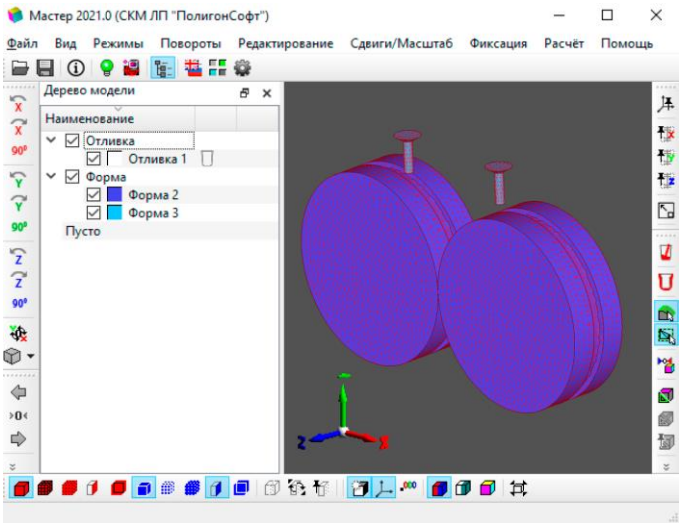

Рис. 2. Модуль «Мастер» с загруженной моделью кристаллизатора

Результаты и обсуждение

Первые частицы твердого расплава наблюдаются во внутренней зоне канала кристаллизатора, тогда как внешняя зона имеет более высокую температуру и остается жидкой, что связано с более низким коэффициентом теплопередачи у воздуха. По мере вращения кристаллизатора температура расплава продолжает снижаться. При достижении температуры около 610°С в зоне смыкания сегментов кристаллизатора происходит соединение двух потоков расплава, при этом на внутренней стороне канала наблюдается уже твердая фаза сплава АД31 с температурой 590-600°С (рис. 3). После выхода заготовки из этой зоны остывание материала продолжается. Однако на этой стадии контакт нагретого материала с охлаждаемыми сегментами отсутствует, т.е. охлаждение продолжается за счет теплообмена с окружающей средой. Этим объясняется более протяженная область с температурой ниже 590 °С. В дальнейшем при достижении температуры ниже 570 °С заготовка полностью затвердевает.

С учетом минимальной необходимой длины заготовки 150-200 мм для последующего деформирования, средняя температура по сечению будет составлять примерно 505±5°С (рис. 4). Данная температура будет исходной для начала моделирования процесса деформирования в Deform.

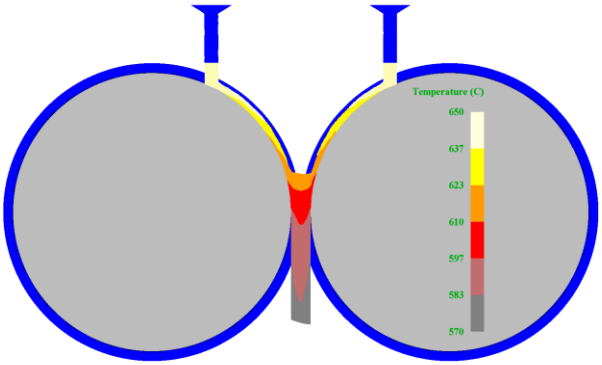

Рис. 3. Процесс затвердевания расплава
в валковом кристаллизаторе

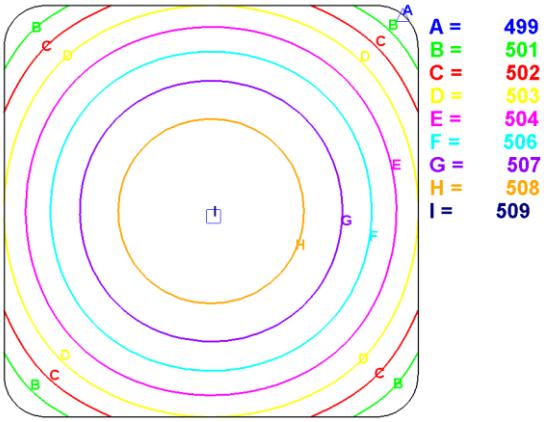

Рис. 4. Распределение полей температуры по сечению
заготовки на расстоянии 200 мм от выхода
из кристаллизатора

Далее было проведено изучение влияния скорости вращения сегментов кристаллизатора на интенсивность затвердевания расплава по сечению (рис. 5). Для этого были рассчитаны модели кристаллизации со следующими значениями скорости вращению сегментов: 20 об/мин, 10 об/мин, 5 об/мин, 45 об/мин, 60 об/мин. Во всех моделях проводился замер температуры в сечении заготовки на расстоянии 200 мм от выхода из кристаллизатора.

В результате анализа полученных полей были найдены средние значения температуры по сечению: 566±4°C при 60 об/мин; 540±10°C при 45 об/мин; 480±10°C при 20 об/мин; 440±10°C при 10 об/мин; 405±5°C при 5 об/мин.

Заключение (Выводы)

В работе было проведено моделирование кристаллизации алюминиевого сплава АД31 сечением 20×20 мм в валковом кристаллизаторе. Анализ полученной модели показал, что за счет малого сечения заготовки на выходе из кристаллизатора происходит полное затвердевание расплава. Варьирование значениями скорости вращения сегментов кристаллизатора, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения от базового значения 30 об/мин показало, что при всех скоростях на расстоянии 200 мм от выхода из кристаллизатора в сечении заготовки полностью отсутствует жидкая фаза сплава.

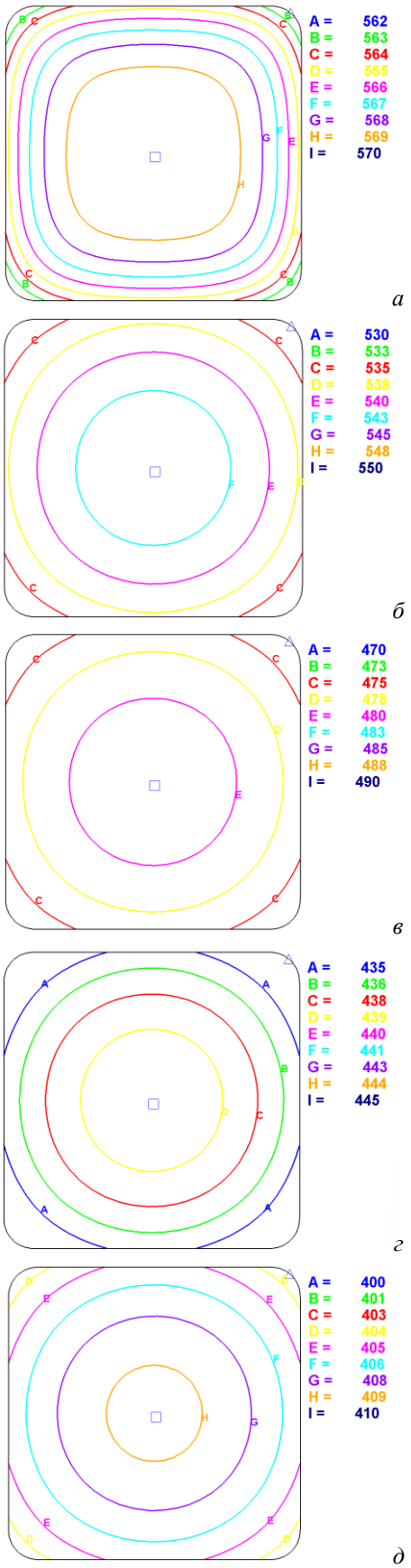

Рис. 5. Поля температур при варьировании скоростью
вращения сегментов:
а – 60 об/мин; *б* – 45 об/мин; *в* – 20 об/мин;
г – 10 об/мин; *д* – 5 об/мин

Литература

1. Konstantinov I.L. Obtaining welding wire from alloy 1580 by technology including the method of combined rolling-extrusion / I.L. Konstantinov, V.N. Baranov, E.Y. Zenkin, S.B. Sidelnikov, A.D. Arnautov, P.O. Yuryev, A.I. Bezrukikh, D.S. Voroshilov, N.N. Zagirov, V.M. Bespalov, S.V. Belyaev, Y.N. Mansurov // Applied Physics A: Materials Science and Processing. – 2024. – vol. 130, is., 6. – 403.

2. Загиров Н.Н. Расчетно-экспериментальная оценка условия реализации процесса совмещенной прокатки-прессования с использованием метода баланса мощностей / Н.Н. Загиров, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, В.М. Беспалов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2016. – № 1. – С. 19-25.

3. Belyaev S.V. Modeling thermal conditions of the process combined rolling-extruding / S.V. Belyaev, N.N. Dovzhenko, S.B. Sidelnikov, A.L. Kiselev // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 167-171.

4. Фастыковский А.Р. Область осуществимости процесса прокатки - прессования и эффективные режимы деформирования / А.Р. Фастыковский // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2011. – № 3. – С. 26-29.

5. Shimov G.V. FEM Simulation of Copper Busbar Pressing on the Continuous Extrusion Line “CONFORM” / G.V. Shimov, A.A. Bogatov, D.S. Kovin // Solid State Phenomena. – 2018. – vol. 278. – P. 158-165.

6. Ershov A.A. Simulation of the Consolidation of a Porous Material in a Combined Rolling-Extrusion Process / A.A. Ershov, Y.N. Loginov, N.N. Zagirov, E.V. Ivanov // Metallurgist. – 2016. – vol. 60, is. 5-6. – P. 561-565.

7. Bartnicki J. Numerical analysis of feed rate influence on hollow hub shape during rolling extrusion process / J. Bartnicki // Key Engineering Materials. – 2014. – vol. 572. – P. 323-326.

8. Bartnicki J. Numerical analysis of rolling extrusion process of a hollow hub / J. Bartnicki // Archives of Metallurgy and Materials. – 2012. – vol. 57, is. 4. – P. 1137-1142.

9. Фастыковский А.Р. Экспериментальное изучение процесса прокатки – прессования // Кузнечно-штамповочное производство. – 2010. – №11. – С. 11-14.

10. Luis-Perez C.J., Gonzalez P.A., Gil J., Alkorta J. Procesado continuo de materiales metalicos mediante deformacion plastica en canal polyangular // ES Patent No 2224787, 2006 (in Spanish).

11. Корчунов А.Г. Принципы проектирования непрерывного способа получения стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой / А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, М.А. Полякова, Д.Г. Емалеева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 1. – С. 43-46.

12. Гулин А.Е. Аналитическое исследование параметров процесса деформационного наноструктурирования проволоки / А.Е. Гулин, Д.Г. Емалеева, М.А. Полякова // Механическое оборудование металлургических заводов. - 2012. – № 1. – С. 161-167.

13. Naizabekov A. Combined process “helical rolling-pressing” and its effect on the microstructure of ferrous and non-ferrous materials / A. Naizabekov, S. Lezhnev, A. Arbuz, E. Panin // Metallurgical Research & Technology. – 2018. – vol. 115, is. 2. – 213.

14. Naizabekov A. Structure and Mechanical Properties of Steel in the Process “Pressing–Drawing” / A. Naizabekov, I. Volokitina, A. Volokitin, E. Panin // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – vol. 28, is. 3. – P. 1762-1771.

15. Lopatina E.S. Metallographic tests of modifying ability of rods from aluminum alloys obtained by combined casting and rolling-extruding / E.S. Lopatina, V.S. Biront, S.B. Sidelnikov // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2014. – vol. 7, is. 2. – P. 127-131.

16. Voroshilov D.S. Obtaining Al–Zr-Hf wire using electromagnetic casting, combined rolling-extrusion, and drawing / D.S. Voroshilov, M.M. Motkov, S.B. Sidelnikov, R.E. Sokolov, A.V. Durnopyanov, I.L. Konstantinov, V.M. Bespalov, T.V. Bermeshev, I.S. Gudkov, M.V. Voroshilova, Y.N. Mansurov, V.A. Berngardt // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2022. – vol. 5, is. 3. – P. 352-368.

17. Sidelnikov S.B. Technology for the producing calibrated bars made of aluminum alloy 6082 prepared using ingotless rolling-pressing // S.B. Sidelnikov, E.S. Lopatina, I.L. Konstantinov, D.S. Voroshilov, Y.N. Mansurov, A.S. Bersenev, A.V. Durnopyanov // Metallurgist. – 2024. – vol. 67, is. 9-10. – P. 1293-1301.

18. Падалка В.А. Исследование структуры и свойств литых, и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr, полученных совмещенными методами литья и прокатки-прессования / В.А. Падалка, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников // Литейщик России. – 2011. – №5. – С. 33-36.

19. Сидельников С.Б. Исследование структуры металла и оценка свойств опытных образцов из сплава системы Al–Zr для производства электропроводников с помощью методов литья и обработки давлением / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Л.П. Трифоненков, М.В. Первухин, В.Н. Баранов, Е.С. Лопатина, И.Н. Довженко, В.М. Беспалов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2012. – № 1. – С. 51-55.

20. Naizabekov A. Effect of Combined Rolling–ECAP on Ultrafine-Grained Structure and Properties in 6063 Al Alloy / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina, A. Arbuz, T. Koinov, I. Mazur // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – vol. 28, is. 1. – P. 200-210.

21. Монастырский А.В. СКМ ЛП "ПОЛИГОН-СОФТ" 13.X. Обзор, итоги, планы / А.В. Монастырский, М.Д. Тихомиров // Литейщик России. – 2013. – № 6. – С. 20-24.

22. Анцев А.В. Подход к построению 3D-моделей литейных систем на основе тонкостенных форм с использованием САПР "КОМПАС-3D" / А.В. Анцев, С.К. Захаров, А.А. Арсеньева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2024. – № 8. – С. 529-534.

DOI: 10.24892/RIJIE/20250309

Computer Modeling and Investigation of the Melt Crystallization Process in the Casting and Rolling Block of the “Casting-Rolling-ECAP” Combined Process

Panin E.A.
NPJSC «Karaganda Industrial University»,
Temirtau, Kazakhstan
Cooper802@mail.ru

Kuis D.V.
Belarusian State Technological University,
Minsk, Belarus
dmitrykuis@mail.ru

Lezhnev S.N.
NPJSC «Rudny Industrial University»,
Rudny, Kazakhstan
Sergey_legnev@mail.ru

Arbuz A.S.
AEO «Nazarbayev University»,
Astana, Kazakhstan
zubra_kz@mail.ru

Abstract. **The use of combined processes combining casting and pressure treatment in the production of various metal products is one of the effective ways to comprehensively solve problems related to improving the quality of incoming metal products and the manufacturability of production, as well as reducing material costs and energy consumption. In this work, computer modeling and study of the crystallization process of aluminum alloy AD31 in a roller mold were carried out as the initial stage (obtaining an initial billet with a cross-section of 20×20 mm) of a new combined deformation process "casting-rolling-ECAP" using the program "Polygon-Soft". Analysis of the obtained model showed that due to the small cross-section of the workpiece, the melt completely solidifies at the outlet of the mold. Varying the rotational speeds of the mold segments, both decreasing and increasing from the base value of 30 rpm, showed that at all speeds at a distance of 200 mm from the mold outlet, the liquid phase of the alloy is completely absent from the billet section.**

Keywords: **“casting-rolling-ECAP” combined process, modeling, liquid phase, crystallization, temperature field.**

Библиографическое описание статьи

Панин Е.А. Компьютерное моделирование и исследование процесса кристаллизации расплава в литейно-прокатном блоке совмещенного процесса «литье-прокатка-РКУП» / Е.А. Панин, С.Н. Лежнев, Д.В. Куис, А.С. Арбуз // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №3. – С. 57-61. DOI: 10.24892/RIJIE/20250309

Reference to article

Panin E.A., Lezhnev S.N., Kuis D.V., Arbuz A.S. Computer modeling and investigation of the melt crystallization process in the casting and rolling block of the «Casting-Rolling-ECAP» combined process, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.3, pp. 57-61. DOI: 10.24892/RIJIE/20250309
