

## Технологии литья и прокатки алюминиевых сплавов: цифровизация и перспективы применения

*В.Ю. Бажин, Д.Х. Чан*

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*

**Аннотация:** В статье рассмотрены современные подходы к технологиям литья и прокатки алюминиевых сплавов, характеризующихся уникальными физико-механическими свойствами, которые определяют их ключевое значение в развитии промышленного производства. Проведен анализ традиционных методов литья, таких как кокильное, центробежное и литье под давлением, а также процессов горячей, холодной и высокоточной прокатки. Особое внимание уделено перспективам цифровизации указанных технологических процессов, включая применение цифровых двойников, методов машинного обучения и анализа больших данных, что позволяет оптимизировать производственные операции, улучшать качество продукции и снижать затраты.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, цифровые двойники, оптимизация производственных процессов, металлургическая промышленность, литье, прокатка.

### Актуальность

Современные алюминиевые сплавы занимают ключевое место в промышленности благодаря уникальному сочетанию физических, механических и технологических характеристик, таких, как высокая удельная прочность, низкая плотность, коррозионная стойкость и отличная обрабатываемость [1, 2]. В условиях глобальной цифровизации и возрастающих требований к экологичности и энергоэффективности промышленных процессов особую значимость приобретает внедрение инновационных подходов. Кроме того, растущие запросы мирового рынка на продукцию из алюминиевых сплавов с улучшенными эксплуатационными характеристиками требуют модернизации традиционных методов обработки. Изучение и разработка современных технологий литья и прокатки алюминиевых сплавов, а также интеграция цифровых решений для оптимизации производственных процессов представляют собой стратегически важное направление для обеспечения устойчивого развития металлургической промышленности, повышения конкурентоспособности

---

предприятий и удовлетворения потребностей различных секторов экономики.

### **Алюминиевые сплавы в различных отраслях промышленности**

Алюминиевые сплавы занимают важное место в современной промышленности. Их применение охватывает широкий спектр отраслей, включая авиацию, автомобилестроение, строительство, энергетический сектор и упаковочную промышленность [3, 4].

- применение в производстве бытовых изделий: в повседневной жизни мы встречаем много изделий, изготовленных из алюминиевых сплавов — это наиболее близкие и привычные предметы. К ним относятся такие предметы, как кастрюли, дуршлаги, ведра, ванны, складные лестницы, столы и стулья, а также различные элементы для наружного и внутреннего оформления дома. Одним из отличных применений алюминиевых сплавов является изготовление таких деталей, как протезы для инвалидов, которые обеспечивают хорошую поддержку;

- применение в транспортной отрасли: благодаря своей легкости и легкости в обработке, алюминиевые сплавы широко используются для производства различных компонентов и оборудования транспортных средств. Особенно благодаря хорошей коррозионной стойкости, алюминиевые сплавы часто применяются для изготовления частей морских судов, портового оборудования, в нефтегазовой промышленности, особенно для элементов, часто контактирующих с морской водой. Кроме того, этот материал используется для производства деталей оболочек и каркасов самолетов, поездов, ракет и других транспортных средств благодаря высокой прочности, а также хорошей способности к прокатке в тонкие листы и вытягиванию в проволоку;

- авиационно-космическая отрасль предъявляет высокие требования к материалам, используемым в конструкции летательных

аппаратов, в частности, по критериям удельной прочности и термостойкости. Алюминиевые сплавы позволяют существенно уменьшить массу конструкций, обеспечивая надежность и долговечность [5, 6];

- применение в машиностроении и строительстве: продукция для промышленного оборудования и строительных конструкций невозможно без использования алюминиевых сплавов. Особенно это касается оборудования для строительных конструкций, таких как лестницы, оконные рамы, двери и водопроводные трубы;

- применение в электронике: алюминиевые сплавы используются для изготовления мелких деталей и микросхем в таких технологичных продуктах, как часы, мобильные телефоны, компьютеры и другие электронные устройства. Это объясняется их преимуществами, такими, как легкий вес, простота в обработке и формовке, а также хорошая электропроводность и теплопроводность. Кроме того, алюминиевые сплавы применяются при производстве проводов, компонентов солнечных панелей и конструктивных элементов электростанций, обеспечивая надежность и долговечность системы.

### **Основные методы литья и прокатки алюминиевых сплавов**

В зависимости от метода производства и состава, алюминиевые сплавы подразделяются на литейные и деформируемые. К литейным алюминиевым сплавам относятся материалы, используемые для производства деталей сложной геометрии методом литья [7, 8], такие, как:

- кокильное литье: Этот метод подразумевает использование форм (кокилей), обычно изготавливаемых из металла. Кокильное литье применяется для производства деталей средней и большой массы, которые должны обладать высокими механическими свойствами и точностью. Одним из основных преимуществ данного метода является высокая прочность отливок. Однако процесс требует значительных затрат на изготовление форм

---

и имеет ограничения в отношении сложности форм и возможностей для производства деталей с высокой геометрической сложностью;

- центробежное литье: в этом методе расплавленный металл заливается во вращающуюся форму. Это позволяет получать изделия с высокой плотностью и прочностью. Центробежное литье эффективно используется для производства труб и кольцевых деталей. Однако ограниченность типов форм и высокая стоимость оборудования являются недостатками этой технологии;

- литье под давлением: литье под давлением представляет собой технологический процесс, заключающийся в заливке расплавленного металла в форму под высоким давлением и при значительных скоростях. В рамках этого процесса металл подвергается плавлению при высоких температурах, что позволяет преобразовать его из твердого состояния в жидкое. Затем расплавленный металл под действием высокого давления вводится в форму, где принимает нужную геометрическую конфигурацию. Этот метод особенно эффективен для производства изделий с сложной геометрией. Для реализации данного процесса используется специализированное оборудование, включающее машины для литья под давлением, которые оснащены встроенными или отдельными печами для нагрева исходного металлического материала до жидкого состояния.

- полунепрерывное литье представляет собой технологический процесс, при котором жидкий металл подается в форму, обеспечивая образование изделия заданной формы. Однако процесс охлаждения и извлечения готового изделия не осуществляется непрерывно в течение всего времени литья, а может прерываться или регулироваться между отдельными отливками. Метод полунепрерывного литья широко используется в металлообрабатывающей промышленности, особенно при производстве

---

крупногабаритных изделий или при необходимости изменения формы изделия в процессе литья.

Деформируемые сплавы подвергаются обработке посредствомковки, прессования, экструзии и другими способами обработки давлением, что обеспечивает получение изделий с повышенными прочностными и механическими характеристиками. Указанные методы способствуют изменению микроструктуры сплавов, что приводит к улучшению их характеристик, включая предел прочности на разрыв, ударную вязкость и усталостную прочность, в сравнении с необработанными алюминиевыми сплавами. Различают несколько основных типов прокатки [9, 10]:

- Горячая прокатка осуществляется при повышенных температурах, обычно превышающих  $500^{\circ}\text{C}$ , что способствует значительному увеличению пластичности металла и уменьшению усилий, необходимых для его деформации. Этот процесс используется преимущественно для обработки крупногабаритных заготовок и получения изделий, таких, как толстолистовые металлы, трубы и другие массивные элементы. Высокая температура обработки позволяет устранить внутренние дефекты структуры материала и улучшить его механические свойства.

- Холодная прокатка представляет собой процесс деформации металла при температуре, близкой к комнатной, либо с незначительным её повышением. Это обеспечивает высокую точность обработки и улучшение механических свойств материала, таких, как прочность и жесткость. Данный метод применяется для производства листовых и полосовых изделий, которые характеризуются точными размерами и гладкой поверхностью.

### **Интеграция цифровых решений в производстве**

Модернизация процессов литья и прокатки представляет собой ключевой элемент для повышения производственной эффективности, оптимизации затрат и улучшения качества выпускаемой продукции.

---

Современные инновационные подходы, включая внедрение цифровых технологий, машинного обучения, анализа больших данных, искусственного интеллекта создают возможности для оптимизации технологических процессов, повышения гибкости и улучшения управления на всех уровнях производства [11, 12].

Цифровизация процессов литья и прокатки существенно расширяет возможности управления производственными потоками. Внедрение таких технологий, как цифровые двойники, автоматизированные системы управления (АСУ) и интеграция новых методов мониторинга и анализа данных в реальном времени, позволяет значительно повысить эффективность процессов, улучшить качество продукции и снизить операционные затраты.

Одной из ключевых технологий, внедряемых в процессы литья и прокатки, является использование цифровых двойников — виртуальных моделей реальных физических объектов или процессов [13, 14]. Цифровой двойник позволяет создать точную реплику производства или изделия с помощью математических моделей и симуляций, что значительно улучшает процесс оптимизации технологических этапов. В контексте литья цифровые двойники могут моделировать поведение расплавленного металла при различных температурных и давлении режимов, прогнозируя его текучесть и механические свойства. Это способствует ускорению разработки новых сплавов и конструкций, снижению числа пробных отливок и минимизации затрат на производство, а также уменьшению числа дефектных изделий. В области прокатки цифровой двойник используется для моделирования поведения материала на различных стадиях деформации, предсказания дефектов, таких как трещины или перегрев, а также для оптимизации параметров прокатки с целью получения материала с необходимыми характеристиками. Применение цифровых двойников позволяет не только повысить качество конечной продукции, но и улучшить

---

управление процессами, что ведет к снижению энергозатрат и повышению общей эффективности.

Цифровизация процессов литья и прокатки тесно связана с внедрением АСУ, которые позволяют в реальном времени контролировать и корректировать ключевые параметры производственных процессов, такие как температура, давление, скорость потока металла и сила прокатки [15, 16]. Это способствует поддержанию стабильности и высокого качества продукции на всех этапах ее производства. В процессе литья автоматизация обеспечивает эффективное управление подачей расплавленного металла в форму, а также позволяет точно контролировать скорость охлаждения и поддержание заданных параметров. Это способствует минимизации вероятности возникновения дефектов, таких, как трещины, пористость и нежелательная кристаллизация. В процессе прокатки система управления автоматически корректирует параметры, отслеживая изменение свойств материала при деформации.

Системы мониторинга в режиме реального времени обеспечивают высокую эффективность управления процессом литья и прокатки. Информация, собранная с датчиков, будет передаваться непосредственно в центральную систему управления, обеспечивая немедленную обратную связь и возможность автоматической корректировки технологических процессов.

Вторым важным этапом процесса модернизации является применение методов машинного обучения и анализа больших данных к процессам литья и прокатки.

Машинное обучение принесло множество преимуществ в оптимизации производственных операций. Модели машинного обучения позволяют эффективно прогнозировать спрос и планировать производство, помогая оптимизировать запасы и ресурсы. Они также используются для анализа данных с датчиков оборудования для обнаружения и прогнозирования сбоев

---

до их возникновения, что позволяет проводить профилактическое обслуживание оборудования. Кроме того, машинное обучение помогает оптимизировать параметры производственного процесса, такие как температура и давление, для повышения производительности, улучшения качества продукции и сокращения отходов [17, 18].

Большие данные — это огромные объемы данных, генерируемые машинами, датчиками, процессами и сотрудниками на протяжении всего производственного цикла [19]. Эти данные поступают из различных источников, таких как датчики устройств, логистика цепочки поставок и даже отзывы клиентов. Эти наборы данных могут быть структурированными, например числами и категориями, или неструктурированными данными, такими как аудио, видео или текст. Ценность больших данных заключается в их способности собирать данные и выявлять идеи и закономерности, которые традиционный анализ данных может упустить. Производственная среда сложна и динамична, и на нее влияет множество переменных, влияющих на производительность, качество и эффективность.

Искусственный интеллект (ИИ) в производстве использует алгоритмы машинного обучения и глубокого обучения для анализа различных больших наборов данных на предмет закономерностей [20]. Затем ИИ может использовать эти данные для выполнения задач, автоматизации процессов или предоставления информации, которую производители могут использовать в интересах своего бизнеса. Хотя искусственный интеллект можно использовать по-разному, наиболее распространенными приложениями в производстве являются автоматизация производства, включая планирование и управление ресурсами, интеллектуальные операции и управление, а также мониторинг качества и процессов, оптимизацию цепочки поставок и принятие решений на основе данных.

---



Варианты использования ИИ в производстве можно сгруппировать в три основные категории: автоматизация производства, автоматизация процессов и улучшение качества продукции и качества обслуживания клиентов [21, 22].

**Автоматизация производства:** Производители переходят на более полностью автоматизированные производства с использованием различных типов роботов. Автономные мобильные роботы, автоматизированные управляемые транспортные средства, шарнирно-сочлененные роботы, такие как роботизированные руки и коллаборативные роботы, которые помогают людям выполнять работу, также известные как коботы, развертываются в заводских цехах и на складах, чтобы помочь ускорить работу. процессы, повышают эффективность и повышают безопасность. Они используются в различных областях применения, включая сварку, сборку, погрузочно-разгрузочные работы и защиту складов. Другие типы ИИ в производстве могут поддерживать оптимизированное время безотказной работы, прогнозирование спроса, эффективное прогнозирование потерь, сокращение отходов, мониторинг и управление энергетическими ресурсами, а также ситуационный мониторинг на предмет деструктивных моделей или действий.

**Автоматизация процессов:** использование искусственного интеллекта в автоматизации процессов может повысить гибкость производства, сократить время переналадки и контролировать состояние оборудования для регулярного и профилактического обслуживания. Сборочные линии можно регулировать по скорости, работе и точности, чтобы адаптироваться к меняющимся производственным потребностям. ИИ также может выполнить углубленный анализ ситуации, чтобы предсказать потенциальные результаты изменений процессов. ИИ также можно использовать для проверки качества — на этапах подготовки к производству, производства, распределения и загрузки контейнеров — для обеспечения единообразия продукции и

---

выявления скрытых потенциальных изменений в системе. Используя ИИ, производители могут оптимизировать свои операции, сырье, логистику доставки и ресурсы с высокой прозрачностью и подотчетностью. А искусственный интеллект может помочь с роботизированной автоматизацией процессов для оформления документов, таких как заказы на покупку, счета-фактуры и отчеты о контроле качества.

Перспектива объединения этих технологий заключается в построении АСУ, в которой производственный процесс оптимизируется в режиме реального времени благодаря алгоритмам машинного обучения и анализу больших данных.

### **Заключение**

Модернизация технологического процесса литья и прокатки алюминиевых сплавов является важным фактором повышения эффективности производства. В контексте интеллектуального производства что цифровые двойники, автоматизированные системы управления, машинное обучение и большие данные могут использоваться для оптимизации производственных процессов, выявления потенциальных проблем и возможностей для улучшения, а также принятия обоснованных решений о планировании производства и распределении ресурсов.

### **Литература**

1. Ma Z.Y., Feng A.H., Chen D.L., Shen J. Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: microstructural evolution and mechanical properties // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2018. V. 43. № 4. pp. 269-333.

2. Zhang J., Song B., Wei Q., Bourell D., Shi Y. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing

trends // Journal of Materials Science & Technology. 2019. V.35. №2. pp. 270-284.

3. Guan R.G., Tie D. A review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2017. V.30. pp. 409-432.

4. Guan R., Lou H., Huang H., Liang X. Development of aluminum alloy materials: current status, trend, and prospects // Strategic Study of Chinese Academy of Engineering. 2020. V.22. №5. pp. 68-75.

5. Wang G., Zhao Y., Hao Y. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing // Journal of Materials Science & Technology. 2018. V.34. №1. pp. 73-91.

6. El-Hameed A., Afaf M., Abdel-Aziz Y.A. Aluminium alloys in space applications: a short report // Journal of advanced research in applied sciences and engineering technology. 2021. V.22. №1. pp. 1-7.

7. Горюхин А.С., Гайнцева Е.С., Шайхутдинова И.И. Многомерная модель выбора способа литья для получения отливок из алюминиевых сплавов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т.19. №2(68). С. 9-13.

8. Левчук, В.В., Трапезников А.В., Пентюхин С.И., Леонов А.А. Способы литья тонкостенной детали из алюминиевого сплава типа силумин (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. Т.6 №66. С. 30-38.

9. Данилов С.В., Резник П.Л., Лобанов М.Л., Головнин М.А., Логинов Ю.Н. Влияние горячей прокатки на анизотропию механических свойств алюминиевого сплава 6061 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2017. Т.17. №1. С. 73-80.

10. D'Antuono D.S., Gaies J., Golumbfskie W., Taheri M.L. Direct measurement of the effect of cold rolling on  $\beta$  phase precipitation kinetics in 5xxx series aluminum alloys // Acta Materialia. 2017. V.123. pp. 264-271.

---

11. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., Suman R. Enabling flexible manufacturing system (FMS) through the applications of industry 4.0 technologies // *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. 2022. V. 2. pp. 49-62.
12. Cioffi R., Travaglionni M., Piscitelli G., Petrillo A., De Felice F. Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Smart Production: Progress, Trends, and Directions // *Sustainability*. 2020. V.12 URL: [mdpi.com/2071-1050/12/2/492](https://doi.org/10.3390/s12020492).
13. Sun Y., Li J., Sun Y., Song L., Yang Q., Wang X. Modeling and Simulation of Shape Control Based on Digital Twin Technology in Hot Strip Rolling // *Sensors*. 2024. V.24 URL: [mdpi.com/1424-8220/24/2/614](https://doi.org/10.3390/s24020614).
14. Gasiyarov V.R., Bovshik P.A., Loginov B.M., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A. Substantiating and implementing concept of digital twins for virtual commissioning of industrial mechatronic complexes exemplified by rolling mill coilers // *Machines*. 2023. V.11. №2 URL: [mdpi.com/2075-1702/11/2/276](https://doi.org/10.3390/m11020276).
15. David J., Švec P., Pasker V., Garzinová R. Usage of Real Time Machine Vision in Rolling Mill // *Sustainability*. 2021. V.13 URL: [mdpi.com/2071-1050/13/7/3851](https://doi.org/10.3390/s13073851).
16. Svetlík J., Malega P., Rudy V., Rusnák J., Kováč J. Application of Innovative Methods of Predictive Control in Projects Involving Intelligent Steel Processing Production Systems // *Materials*. 2021. V.14 URL: [mdpi.com/1996-1944/14/7/1641](https://doi.org/10.3390/ma14071641).
17. Dogan A., Birant D. Machine learning and data mining in manufacturing // *Expert Systems with Applications*. 2021. V.166 URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095741742030823X](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114203).
18. Bertolini M., Mezzogori D., Neroni M., Zammori F. Machine Learning for industrial applications: A comprehensive literature review // *Expert*



Systems with Applications. 2021. V.175 URL:  
[sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095741742100261X](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095741742100261X).

19. Gao R.X., Wang L., Helu M., Teti R. Big data analytics for smart factories of the future // CIRP annals. 2020. V.69(2). pp. 668-692.

20. Novak A., Bennett D., Kliestik T. Product decision-making information systems, real-time sensor networks, and artificial intelligence-driven big data analytics in sustainable Industry 4.0 // Economics, Management and Financial Markets. 2021. V.16(2). pp. 62-72.

21. Ribeiro J., Lima R., Eckhardt T., Paiva S. Robotic process automation and artificial intelligence in industry 4.0—a literature review // Procedia Computer Science. 2021. V.181. pp. 51-58.

22. Sahoo S., Lo Ch.-Y. Smart manufacturing powered by recent technological advancements: A review // Journal of Manufacturing Systems. 2022. V.64. pp. 236-250.

### References

1. Ma Z.Y., Feng A.H., Chen D.L., Shen J. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2018. V. 43. № 4. pp. 269-333.

2. Zhang J., Song B., Wei Q., Bourell D., Shi Y. Journal of Materials Science & Technology. 2019. V.35. №2. pp. 270-284.

3. Guan R.G., Tie D. Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2017. V.30. pp. 409-432.

4. Guan R., Lou H., Huang H., Liang X. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering. 2020. V.22. №5. pp. 68-75.

5. Wang G., Zhao Y., Hao Y. Journal of Materials Science & Technology. 2018. V.34. №1. pp. 73-91.

6. El-Hameed A., Afaf M., Abdel-Aziz Y.A. Journal of advanced research in applied sciences and engineering technology. 2021. V.22. №1. pp. 1-7.

7. Goryukhin A.S., Gayntseva E.S., Shaykhutdinova I.I. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. V.19. №2(68). pp. 9-13.
  8. Levchuk, V.V., Trapeznikov A.V., Pentyukhin S.I., Leonov A.A. Trudy VIAM. 2018. V.6. №66. pp. 30-38.
  9. Danilov S.V., Reznik P.L., Lobanov M.L., Golovnin M.A., Loginov Yu.N. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya. 2017. V.17. №1. pp. 73-80.
  10. D'Antuono D.S., Gaies J., Golumbskie W., Taheri M.L. Acta Materialia. 2017. V.123. pp. 264-271.
  11. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., Suman R. Internet of Things and Cyber-Physical Systems. 2022. V. 2. pp. 49-62.
  12. Cioffi R., Travaglioni M., Piscitelli G., Petrillo A., De Felice F. Sustainability. 2020. V.12 URL: [mdpi.com/2071-1050/12/2/492](https://doi.org/10.3390/s12020492).
  13. Sun Y., Li J., Sun Y., Song L., Yang Q., Wang X. Sensors. 2024. V.24 URL: [mdpi.com/1424-8220/24/2/614](https://doi.org/10.3390/s24020614).
  14. Gasiyarov V.R., Bovshik P.A., Loginov B.M., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A. Machines. 2023. V.11. №2 URL: [mdpi.com/2075-1702/11/2/276](https://doi.org/10.3390/m11020276).
  15. David J., Švec P., Pasker V., Garzinová R. Sustainability. 2021. V.13 URL: [mdpi.com/2071-1050/13/7/3851](https://doi.org/10.3390/s13073851).
  16. Svetlík J., Malega P., Rudy V., Rusnák J., Kováč J. Materials. 2021. V.14 URL: [mdpi.com/1996-1944/14/7/1641](https://doi.org/10.3390/ma14071641).
  17. Dogan A., Birant D. Expert Systems with Applications. 2021. V.166 URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095741742030823X](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115823).
  18. Bertolini M., Mezzogori D., Neroni M., Zammori F. Expert Systems with Applications. 2021. V.175 URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095741742100261X](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115823).
-



19. Gao R.X., Wang L., Helu M., Teti R. CIRP annals. 2020. V.69 (2). pp. 668-692.
20. Novak A., Bennett D., Kliestik T. Economics, Management and Financial Markets. 2021. V.16 (2). pp. 62-72.
21. Ribeiro J., Lima R., Eckhardt T., Paiva S. Procedia Computer Science. 2021. V.181. pp. 51-58.
22. Sahoo S., Lo Ch.-Y. Journal of Manufacturing Systems. 2022. V.64. pp. 236-250.

**Дата поступления: 21.12.2024**

**Дата публикации: 26.01.2025**