

УДК 65.011.56

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356

**Для цитирования:** Цифровой двойник для управления совмещенной литейно-прокатной линией / П. Н. Якивчук, Т. В. Пискажова, А. В. Сальников, П. М. Гофман // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 347–356. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356.

**For citation:** Yakivchuk P. N., Piskazhova T. V., Salnikov A. V., Gofman P. M. [Digital twin for combined casting and rolling line control]. *Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 347–356. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356.

## Цифровой двойник для управления совмещенной литейно-прокатной линией

П. Н. Якивчук<sup>1\*</sup>, Т. В. Пискажова<sup>1</sup>, А. В. Сальников<sup>2</sup>, П. М. Гофман<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения  
Российская Федерация, 660025, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 95

<sup>2</sup>ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр»  
Российская Федерация, 660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37, стр. 1

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: pavelyakivchuk@yandex.ru

*При производстве и эксплуатации ракетно-космических установок широко используются различные алюминиевые сплавы, как в конструктивных элементах, так и в линиях связи, электро-снабжении.*

*Параметры операций обработки сплавов должны жестко выдерживаться для исключения брака и получения продукции нужного качества. Технологические процессы обработки металлов в космическом машиностроении содержат такие операции, как литье, прокатка, прессование и могут использовать непрерывные линии расплав – кристаллизация – формоизменение, что предъявляет дополнительные требования к комплексному управлению такой линией.*

*Целью работы является создание цифрового двойника для управления совмещенным литейно-прокатным комплексом. На основе ранее представленных математических моделей агрегатов и компонентов комплекса (печь, лоток, кристаллизатор, узел прессования, правильно-охлаждающее устройство, шпули) в программной среде TIA Portal с применением микропроцессорного контроллера S7-1200 разработана программа, которая имитирует изменение параметров как прокатываемого металла, так и устройств литейно-прокатной линии. Представлена структура и пользовательский интерфейс программы. Проведены расчёты параметров технологического цикла при обработке трёх сплавов, которые дают представление о распределении температур и скоростей прокатываемого металла в каждом узле установки.*

*Программу можно использовать на производстве как для предварительных расчетов обработки различных сплавов с целью подбора нужных управляющих воздействий, так и в ходе процесса в составе действующего АСУТП для уточнения параметров охлаждения и скорости литья.*

*Ключевые слова:* цифровой двойник, литейно-прокатная линия, программная среда TIA Portal, обработка алюминиевых сплавов.

## Digital twin for combined casting and rolling line control

P. N. Yakivyuk<sup>1\*</sup>, T. V. Piskazhova<sup>1</sup>, A. V. Salnikov<sup>2</sup>, P. M. Gofman<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Institute of Nonferrous Metals and Materials Science  
95, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation

<sup>2</sup>United Company RUSAL Engineering-Technological Centre LLC  
37/1, Pogranichnikov st., Krasnoyarsk, 660111, Russian Federation

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochi prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: pavelyakivyuk@yandex.ru

*In the production and operation of rocket and space installations, various aluminum alloys are widely used, both in structural elements and in communication lines and power supply. The parameters of alloys processing operations must be strictly maintained in order to exclude defects and obtain products of the required quality. Technological processes of metal processing in space engineering include such operations as casting, rolling, pressing and can use continuous melt-crystallization-shape lines, which imposes additional requirements on the integrated control of such a line.*

*The aim of the work is to create a digital twin to control a combined casting and rolling complex. Based on the previously presented mathematical models of the units and components of the complex (furnace, tray, mold, pressing unit, straightening and cooling device, spools), a program has been developed in the TIA Portal software environment using the S7-1200 microprocessor controller, which simulates the change in parameters of both rolled metal, and devices of the casting and rolling line. The structure and user interface of the program are presented. The calculations of the parameters of the technological cycle in the processing of three alloys were carried out, which give an idea of the distribution of temperatures and speeds of the rolled metal in each unit of the installation.*

*The program can be used in production both for preliminary calculations of the processing of various alloys in order to select the necessary control actions, and during the process as part of an existing process control system to refine the cooling parameters and casting speed.*

*Keywords: digital twin, casting and rolling line, TIA Portal software environment, aluminum alloys processing.*

### Введение

Технология получения готовых изделий при обработке металлов, в особенности длинномерных, является многоцикловой и включает множество промежуточных технологических операций. Эти факторы приводят к высокой себестоимости продукции и, как следствие, к ее низкой конкурентоспособности. В мировой практике металлообработки в последнее время особое развитие приобрели работы, направленные на создание интегрированных мини-производств с реализацией технологий получения изделий из цветных металлов и сплавов по схеме обработки в одной непрерывной линии расплав – кристаллизация – формоизменение [1]. Для этих процессов характерно объединение процессов литья, обработки металлов давлением и термической обработки в единый технологический процесс. Непрерывный процесс позволяет исключить процесс литья крупных слитков, их нагрев и горячую прокатку, что приводит к экономии капитальных затрат и значительному повышению выхода годного. В то же время, такой подход к производству предъявляет дополнительные требования к алгоритмам управления.

Для современного эффективного управления технологиями обработки металлов необходимо создание и использование компьютерных инструментов имитации процессов. Такой инструмент может представлять собой программу для расчета и отображения взаимосвязанных изменений технологических параметров при изменении условий процесса. Имитационные расчеты осуществляются встроенной в программу математической динамической моделью про-

цесса. Опыт применения подобных программ при получении алюминия-сырца описан в работах [2–4].

Моделирование литейно-прокатных установок для задач управления представлено в литературе в ограниченном объёме и направлено на управление параметрами в отдельных узлах (модель натяжения между клетями, регулирование ширины проката и т. п.) [5]. Имеются модели, описывающие тепловое и напряженно-деформированное состояния узла деформации и кристаллизации [1; 6]. Эти модели разрабатывались с целью определения технологических и энергосиловых параметров деформирующего узла для получения полуфабрикатов необходимого качества из алюминия и его сплавов.

Математическая модель, комплексно описывающая взаимосвязанное изменение параметров узлов агрегата совмещенной обработки металла, позволяет рассчитать и визуализировать процесс в каждой точке линии. Программное обеспечение на базе такой модели является виртуальным двойником литейно-прокатной линии и позволяет отладить алгоритмы управления до запуска реального технологического цикла.

Таким образом, создание подобного рода моделей и программ является сложной научно-технической задачей, до настоящего времени не решённой в полном объёме, что определяет актуальность исследований.

### Объект исследования

Объектом исследования является литейно-прокатный комплекс, схематично представленный на рис. 1, и состоящий из: лотка для выливки металла (1), роторного кристаллизатора (2), индукционной печи для нагрева заготовки перед прокаткой (3), прокатной клетки (4), охлаждающе-выпрямительного устройства (5), шпулей для намотки (6).

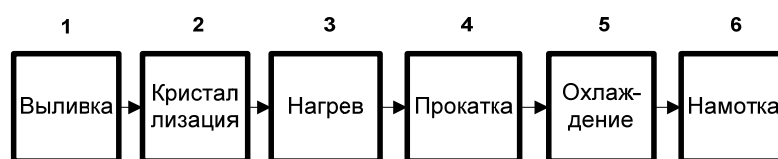


Рис. 1. Состав литейно-прокатной линии

Fig. 1. Composition of the casting and rolling line

Из печи металл поступает в лоток, который направляет поток расплавленного металла в роторный кристаллизатор. Литейное колесо вращается, охлаждая кристаллизуя металл. На выходе из роторного кристаллизатора получается заготовка трапецидальной формы, которая в зависимости от требований технологического процесса и от сплава поступает в индукционную печь для дополнительного нагрева или сразу в прокатную клетку. В процессе прокатки получается заготовка заданного диаметра, которая через охлаждающе-выпрямительное устройство поступает на шпули, где происходит намотка. В агрегате имеются две шпули, меняющие друг друга при достижении максимального количества намотанных слоёв катанки. Заправка прутка и смена шпули происходит автоматически.

### Разработка цифрового двойника литейно-прокатной линии

Ранее нами разрабатывались и тестировались модели отдельных узлов совмещенных линий литья и прокатки. Так, в работах [7–8] уделялось внимание моделированию процессов в агрегате СЛИПП, рассматривались кристаллизация металла в колесах, охлаждение прутка, намотка на шпули. В работе [9] представлен виртуальный СЛИПП – программа для управления этим агрегатом. В работах [10–11] моделировалось формирование заготовки из жидкого металла в литейном колесе и подбирались расход охлаждающей воды для достижения заданных температур заготовки и предотвращения перегрева колеса.

На базе перечисленных работ в ПО TIAPortal[12], на базе контроллера серии S7-1200, разработана программа, реализующая расчёт температуры металла, скоростей металла, а также скоростей вращения каждого агрегата, входящего в состав установки. Блок-схема работы программы представлена на рис. 2.

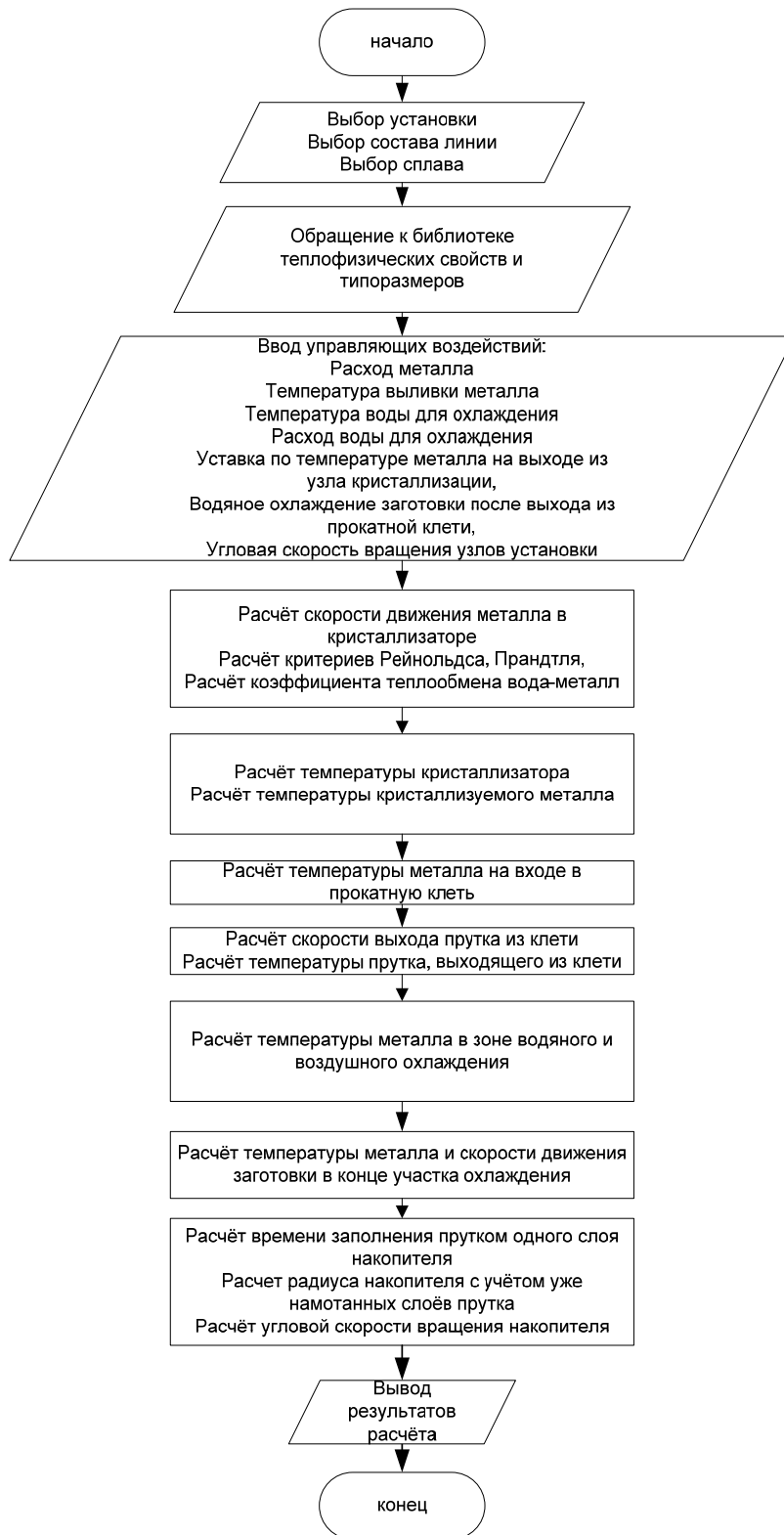


Рис. 2. Блок-схема работы программы

Fig. 2. Block diagram of the program

В библиотеке конструкций и сплавов заданы все теплофизические константы и конструкционные параметры, используемые в модельном расчёте.

А именно: плотность металла (в жидком и твёрдом агрегатных состояниях); теплоёмкость металла (в жидком и твёрдом агрегатных состояниях); плотность и теплопроводность металла из которого состоит кристаллизатор; коэффициенты теплообмена (вода-металл, воздух металл); конструкционные параметры кристаллизатора, прокатной клетки, шпули, расстояния между агрегатами установки; шаг по координате  $x$ ; количество итераций расчёта; тепло кристаллизации; коэффициент теплопроводности среды; коэффициент кинематической вязкости; коэффициент температуропроводности среды.

Расход металла, температура выливки металла, температура воды для охлаждения, расход воды для охлаждения, уставка по температуре металла на выходе из узла кристаллизации, водяное охлаждение заготовки после выхода из прокатной клетки, угловая скорость вращения узлов установки являются управляющими воздействиями, задаются пользователем программы и впоследствии могут быть изменены.

В каждом узле агрегата рассчитывается температура металла, скорость движения металла, угловая скорость вращения агрегата. В роторном кристаллизаторе рассчитывается также температура самого литейного колеса. Показатели температуры рассчитываются по шагам, реализуя численное решение дифференциального уравнения. В агрегате шпуля идёт непрерывный расчёт времени заполнения прутком одного слоя накопителя, для того чтобы учесть изменения диаметра и корректировать угловую скорость вращения накопителя по мере заполнения его катанкой.

Перед началом расчёта необходимо выбрать литейно-прокатную линию и набор агрегатов, входящих в её состав. После этого указываем программе, какой тип сплава использовать для расчёта. После начала работы программы происходит обращение к библиотеке теплофизических свойств и типоразмеров, откуда берутся используемые в расчёте данные. На следующем шаге пользователю предлагается занести в программу значения управляющих воздействий, либо использовать начальные значения, заданные по умолчанию. Расход металла и угловые скорости вращения взаимосвязаны, поэтому если изменить расход, программа произведёт расчёт угловых скоростей и наоборот. В зависимости от конструктивных особенностей агрегатов, входящих в состав линии, а также значений параметров, заданных пользователем, производится пересчёт скорости металла и температуры металла в каждом из узлов литейно-прокатной линии. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

На нём расположены все узлы установки, через которые происходит обработка металла. По каждому узлу в соответствующих полях вывода представлены рассчитанные программой данные о ходе технологического процесса. Для кристаллизатора это температуры металла и самого литейного колеса в нескольких точках, а также расход, заданный пользователем. Для прокатной клетки – температура прутка, скорость прутка, угловая скорость вращения клетки. Для участка охлаждения – температура прутка в конечной точке узла.

В правом верхнем углу экрана пользователю предлагается выбрать тип литейно-прокатной установки, в нижнем правом углу экрана – агрегаты, которые войдут в состав линии. Программой предусмотрена опция включения и отключения водяного охлаждения прутка после выхода заготовки из прокатной клетки. Для агрегата намотки представлены рассчитанные программой данные угловой скорости и количества намотанных слоёв. В правой части окна расположено меню для управления технологическим процессом, где оператор может изменить расход металла, расход воды на охлаждение, начальную температуру выливки, а также выбрать тип сплава. Пользовательский интерфейс позволяет задать желаемую температуру выходящей из роторного кристаллизатора заготовки. Если данная опция активирована соответствующей кнопкой, программа изменяет в заданных пределах расход воды для охлаждения кристаллизатора таким образом, чтобы приблизить текущую температуру выходящей заготовки к указанной пользователем.

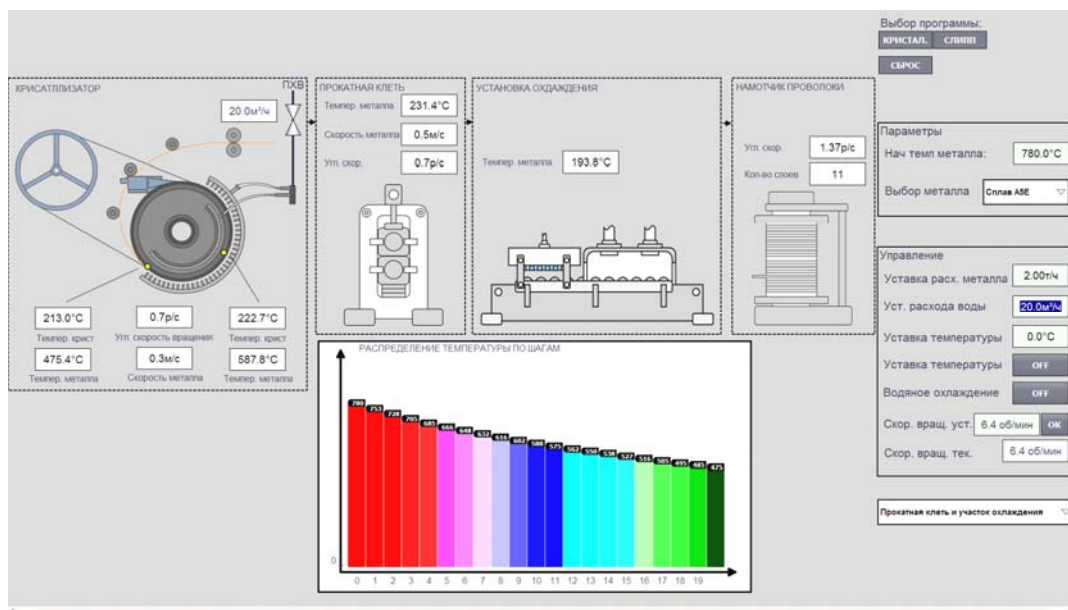


Рис. 3. Интерфейс программы с расчетом сплава А5Е

Fig. 3. Interface of the program with the calculation of alloy A5E

Гистограмма температур, расположенная в центральной нижней части интерфейса, показывает рассчитанные значения температуры металла в кристаллизаторе.

### Моделирование работы линии прокатки

С помощью разработанной программы были выполнены расчёты параметров всей линии для трёх разных сплавов на основе алюминия, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические константы сплавов

Сплав	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоёмкость, Дж/(кг·К)
А5Е	2700	880
АК4	2770	797
АД33	2710	920

Расчеты проводились при одинаковой скорости литья и одинаковом расходе воды на охлаждение. Результаты расчётов представлены на рис. 3–5.

На рис. 3 приведены расчётные данные сплава А5Е. Температура выливки металла – 780 °С, расход металла – 2 т в час. Металл поступает в кристаллизатор (температура выходящей заготовки 475,4 °С), далее в прокатную клетку (температура выходящего прутка 231,4 °С) и через зоны водяного и воздушного охлаждения (температура выходящего прутка 193,8 °С) на накопитель. Расчёт произведён при уровне расхода воды на охлаждение валков 20 м<sup>3</sup>/ч.

Для технологов важным является распределение температур проходящего металла по длине колеса кристаллизатора, поэтому этот график рассмотрен отдельно на рис. 4, длина шага 0,1 м. В шагах с 5 по 7 происходит кристаллизация и в расчетной схеме выделяется тепло кристаллизации.

На рис. 5 и 6 представлены результаты имитационных расчетов параметров литья и прокатки сплавов АК4, АД33 с такой же скоростью литья и работой системы охлаждения, что и на рис. 3 для сплава А5Е. Видно, что сплав АД33 остывает быстрее.

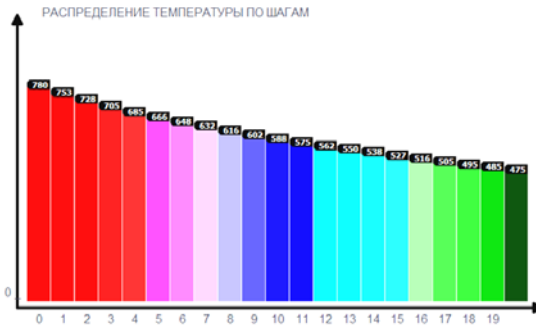


Рис. 4. Программный расчёт распределения температуры в кристаллизаторе сплава А5Е

Fig. 4. Software calculation of the temperature distribution in the mold of the A5E alloy

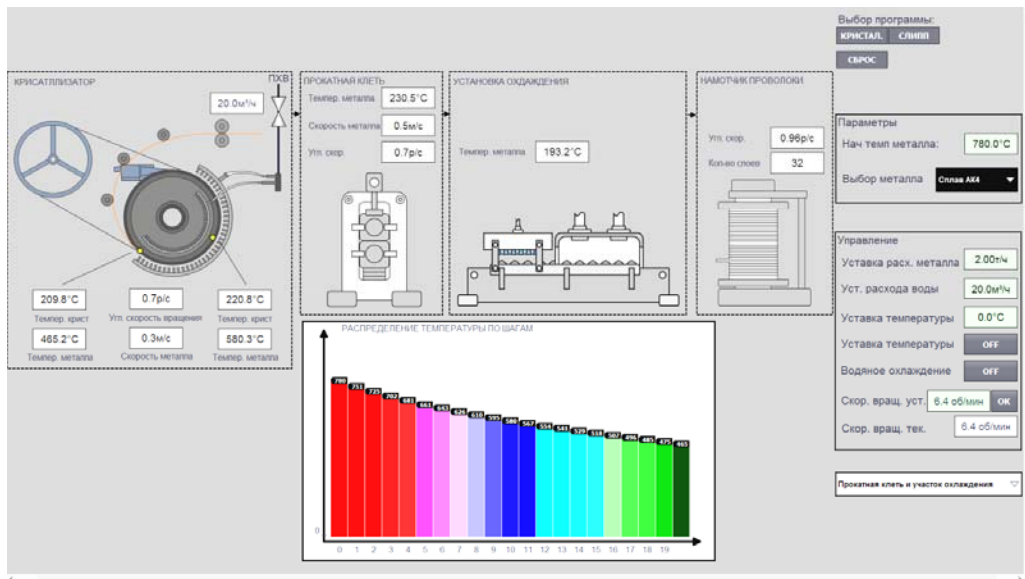


Рис. 5. Программный расчёт сплава АК4

Fig. 5. Software calculation of AK4 alloy

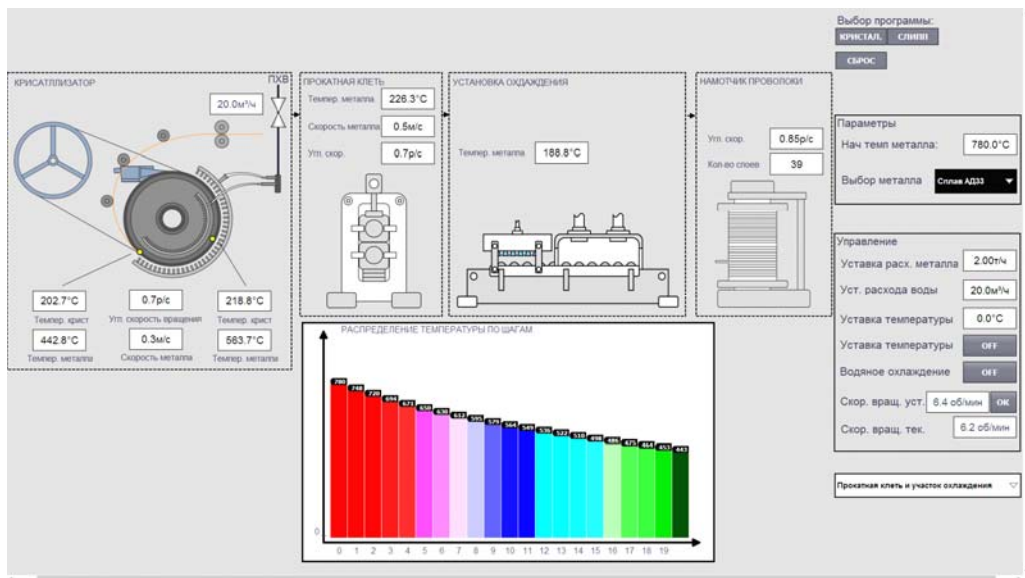


Рис. 6. Программный расчёт сплава АД33

Fig. 6. Software calculation of alloy AD33

В табл. 2 представлены результаты программных расчётов трёх разных сплавов при температуре выливки 780 °С и расходе металла 2 т в час.

Таблица 2

## Значения температур металла на выходе из агрегатов

Сплав	Печь, °С	Кристаллизатор, °С	Клеть, °С	Участок охлаждения, °С
А5Е	780	503,3	417,3	224,8
АК4	780	493,9	409,8	224,2
АД33	780	474,3	391,8	220,7

В табл. 3 представлены результаты имитационных расчётов параметров литья-прокатки сплава А5Е при температуре выливки 780 °С и различных значениях расхода металла.

Таблица 3

## Значения температур металла на выходе из агрегатов для сплава А5Е

Расход металла, тонны/час	Печь, °С	Кристаллизатор, °С	Клеть, °С	Участок охлаждения, °С
2	780	503,3	417,3	224,8
3	780	559,7	493,7	272,9
1	780	389	266,8	200,5

**Заключение**

На основе математических моделей в ПО TIA Portal разработана программа, являющаяся цифровым двойником литейно-прокатной линии. Интерфейс программы позволяет включать и отключать работу некоторых агрегатов, тем самым формируя последовательность обработки заготовки, включать и отключать водяное охлаждение, изменять расход металла и расход воды на охлаждение валков. Проведены расчёты параметров технологического цикла при обработке трёх сплавов, которые дают представление о распределении температур и скоростей прокатываемого металла в каждом узле установки. Программу можно использовать на производстве как для предварительных расчетов обработки различных сплавов с целью подбора нужных управляющих воздействий, так и в ходе процесса для уточнения параметров охлаждения и скорости литья.

**Библиографические ссылки**

1. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Загиров Н. Н. Комбинированные и совмещённые методы обработки цветных металлов и сплавов : монография. М. : МАКСПресс, 2005. 344 с.
2. Piskazhova T. V., Mann V. C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. 2006. Vol. 58, No. 2, P. 48–52.
3. Пискажова Т. В. Программа-имитатор для поддержки принятия технологических решений при получении алюминия // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 41–44.
4. Multimedia for Training Cell Operators / C. Fradet, B. Bouchard, J. Lapointe, G. Rivard // Light Metals. 2001. P. 387–391.
5. Восканьянц А. А. Автоматизированное управление процессами прокатки. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 85 с.
6. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми процессами: монография / Н. Н. Довженко, С. В. Беляев, С. Б. Сидельников и др. // Красноярск : СФУ, 2009. 256 с.
7. Разработка математической модели литейного агрегата СЛИПП, реализующего метод совмещённого литья и прокатки-прессования для производства пресс-изделий из цветных металлов и сплавов / С. Б. Сидельников, Т. В. Пискажова, В. М. Белоліпецкий, П. Н. Якивчук // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : сб. тр. 17 Всеросс. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2013. С. 174–178.



8. Математическая модель процесса совмещённого литья и прокатки-прессования для управления работой агрегата СЛИПП / С. Б. Сидельников, Т. В. Пискажова, В. М. Белолипецкий, П. Н. Якив'юк // Цветные металлы и минералы : сб. докладов VI Междунар. конгресса. Красноярск, 2014. С. 1167–1170.

9. «Виртуальный СЛИПП» – математическая модель для управления агрегатом СЛИПП и её визуализация с помощью программных продуктов Wincc 7.0 и Step 7 / С. Б. Сидельников, Т. В. Пискажова, В. М. Белолипецкий и др. // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 470–477.

10. Якив'юк П. Н., Пискажова Т. В., Белолипецкий В. М. Математическая модель для управления охлаждением роторного кристаллизатора // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21, № 9. С. 104–113.

11. Virtual casting and rolling lines development / P. N. Yakiv'yuk, T. V. Piskazhova, V. M. Belolipetskii, G. A. Nesterov // Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, Vol. 537, №3. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/3/032094/pdf>.

12. Siemens. [Электронный ресурс]. URL: <https://new.siemens.com/ru/ru/produkty/avtomatizacia/industry-software/automation-software/tia-portal/programmnoe-obespechenie.html> (дата обращения: 27.12.2021).

## References

1. Sidelnikov S. B., Dovzhenko N. N., Zagirov N. N. *Kombinirovannye i sovmeshchennye metody obrabotki tsvetnykh metallov i splavov: monografiya* [Combined and combined methods of non-ferrous metals and alloys: a monograph]. Moscow, MAKSPress Publ., 2005, 344 p.

2. Piskazhova T. V., Mann V. C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. 2006, Vol. 58, No. 2, P. 48–52.

3. Piskazhova T. V. [Simulator program to support the adoption of technological decisions in the production of aluminum]. *Automation in industry*. 2010, No. 7, P. 41–44 (In Russ.).

4. Fradet C., Bouchard B., Lapointe J., Rivard G. Multimedia for Training Cell Operators. *Light Metals*. 2001. P. 387–391.

5. Voskan'yants A. A. *Avtomatizirovannoe upravlenie protsessami prokatki* [Automated management processes rolling]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2010, 85 p.

6. Dovzhenko N. N., Belyaev S. V., Sidelnikova S. B. et al. *Pressovanie alyuminievykh splavov: modelirovanie i upravlenie teplovymi protsessami* [Pressing aluminum alloys: modeling and control of thermal processes]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2009, 256 p.

7. Sidelnikov S. B., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Yakiv'yuk P. N. [Development of a mathematical model of the CCRP casting unit, which implements the method of combined casting and rolling-pressing for the production of press products from non-ferrous metals and alloys]. *Metallurgiya: tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo : sbornik trudov 17 Vseross. nauch.-prakt. konf.* [Metallurgy: technology, management, innovation, quality: Proceedings of the 17th All-Russian Scientific and Practical Conference]. Novokuznetsk, 2013, P. 174–178 (In Russ.).

8. Sidelnikov S. B., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Yakiv'yuk P. N. [Mathematical model of the process of combined casting and rolling-pressing to control the operation of the unit of CCRP]. *Tsvetnye metally i mineraly : sbornik докладов VI mezhdunarodnogo kongressa* [Non-ferrous metals and minerals: collection of reports of the VI International Congress]. Krasnoyarsk, 2014, P. 1167–1170 (In Russ.).

9. Sidelnikov S. B., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Yakiv'yukand P. N. et al. Virtual CCRP – a mathematical model for controlling the CCRP unit and its visualization using Wincc 7.0 and Step 7 software products. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 2, P. 470–477 (In Russ.).

10. Yakiv'yuk P. N., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M. [Mathematical model for controlling the cooling of a rotary mold]. *VestnikIrGTU*. 2017, Vol. 21, No. 9, P. 104–113 (In Russ.).

11. Yakiv'yuk P. N., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Nesterov G. A. Virtual casting and rolling lines development. *Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0 : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 537, No. 3. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/3/032094/pdf> (accessed: 27.12.2021).

12. Siemens. Available at: <https://new.siemens.com/ru/ru/produkty/avtomatizacia/industry-software/automation-software/tia-portal/programmnoe-obspechenie.html> (accessed: 27.12.2021).

© П. Н. Якив்யюк, Т. В. Пискажова, А. В. Сальников, П. М. Гофман, 2022

---

**Якивьяк Павел Николаевич** – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии; Сибирский федеральный университет. E-mail: [pavelyakivyuk@yandex.ru](mailto:pavelyakivyuk@yandex.ru).

**Пискажова Татьяна Валериевна** – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии; Сибирский федеральный университет. E-mail: [piskazhova@yandex.ru](mailto:piskazhova@yandex.ru).

**Сальников Александр Владимирович** – начальник отдела опытных конструкторских работ литейного центра; ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». E-mail: [aleksandr.salnikov3@rusal.com](mailto:aleksandr.salnikov3@rusal.com).

**Гофман Павел Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [gofmanpm@sibsau.ru](mailto:gofmanpm@sibsau.ru).

**Yakiv'yuk Pavel Nikolaevich** – senior lecturer of the department Automation of production processes in metallurgy; Siberian Federal University. E-mail: [pavelyakivyuk@yandex.ru](mailto:pavelyakivyuk@yandex.ru).

**Piskazhova Tatyana Valerievna** – Dr. Sc., Professor of the department Automation of production processes in metallurgy; Siberian Federal University. E-mail: [piskazhova@yandex.ru](mailto:piskazhova@yandex.ru).

**Salnikov Alexander Vladimirovich** – head of the experimental design department of the foundry center; United Company RUSAL Engineering-Technological Centre LLC. E-mail: [aleksandr.salnikov3@rusal.com](mailto:aleksandr.salnikov3@rusal.com).

**Gofman Pavel Mikhailovich** – Cand. Sc., associate professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [gofmanpm@sibsau.ru](mailto:gofmanpm@sibsau.ru).

---