

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

Чукин М. В.<sup>1</sup>, Полякова М. А.<sup>2</sup>, Ширяева Е. Н.<sup>3</sup>  
(ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный

*технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск)*

*В металлургической отрасли все большее распространение получают производственные процессы, предусматривающие сложное многооперационное технологическое воздействие на обрабатываемое металлоизделие. Особенно это актуально для металлопродукции, имеющей глубокую степень переработки и относящейся к финишным переделам отрасли. При этом накоплен достаточный опыт формализации представления и описания таких производственных систем, в том числе позволяющий осуществлять автоматизированное проектирование промышленных комплексов. Формализация описания поведения сложных систем строится на представлении их в виде многоуровневых или иерархических систем с решением задач оптимизации. При этом в качестве решения задачи выбора варианта предлагается применять декомпозиционные подходы, которые сводятся к расчленению исходной сложной системы на структурные составляющие, нахождению независимых решений для каждой из них и последующей увязке этих частных решений в общее решение исходной задачи. Основным преимуществом марковских процессов можно считать возможность построения прогнозно-управляемых моделей поведения объекта или группы объектов во времени на основе статистических данных или по результатам эксплуатационных наблюдений. Наиболее часто марковский процесс представляется как модель с вероятностной структурой, которая позволяет определять вероятность попадания объекта в одно из состояний процесса за определённое время или интервал времени. Использование рассматриваемого подхода обеспечивает надежность технологической системы производить продукцию с требуемым уровнем качества и функциональных свойств.*

Ключевые слова: технологический процесс, металлопродукция, системный анализ, неопределенность информации, марковский процесс.

В настоящее время все большее развитие получает ситуация, когда показатели качества выпускаемой продукции с глубокой степенью переработки нормируются не только и

---

<sup>1</sup> Михаил Витальевич Чукин, д.т.н., профессор (m.chukin@mail.ru).

<sup>2</sup> Марина Андреевна Полякова, д.т.н., доцент (m.polyakova@magtu.ru).

<sup>3</sup> Елена Николаевна Ширяева, аспирант (e.shiryayeva@magtu.ru).

не столько нормативными документами (стандартами), но также и дополнительными требованиями (пожеланиями) потребителей. При этом зачастую такие требования либо не в полной мере сочетаются с положениями стандартов, либо являются труднодостижимыми в процессе производства и переработки (например, холоднокатаной ленты, гнутого профиля, металлопроката с покрытиями, изделий из композиционных и порошковых материалов, метизов различного функционального назначения).

Характерной особенностью при разработке новых технологических процессов производства металлоизделий, которые представляют сложные многостадийные технические системы, является отсутствие достоверной информации о взаимосвязи между получаемыми свойствами обрабатываемого материала и параметрами технологического воздействия. Одной из значимых проблем представления, описания и анализа функционирования сложных технологических систем является тот факт, что в таких системах, как правило, сосредоточено большое количество взаимосвязей между характеризующими их параметрами. С точки зрения системного подхода достаточно интересным можно считать описание многостадийной системы в виде совокупности комплексов применяемых ресурсов и связей между ними. При этом целью функционирования такой системы является параллельно-последовательное пошаговое преобразование определенных входных ресурсов в соответствующие наборы выходных ресурсов.

Многовариантные технологические системы могут быть представлены как многовариантные структуры, реализующие первичные и вторичные преобразования динамических систем. В работах [8, 11] любой технологический процесс на предприятии рассматривается с позиции многовариантности. Непосредственно под понятием «вариант технологии» подразумевается многозвенный набор операций. При этом предполагается, что два многозвенных технологических процесса будут относиться к разным вариантам, если они различаются хотя бы одним звеном.

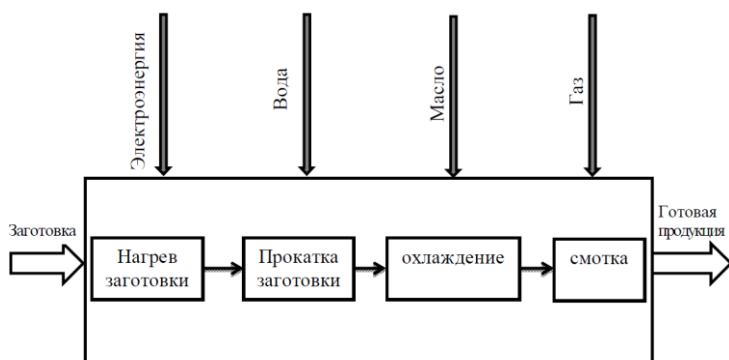
При этом в условиях современного производства с быстро меняющейся номенклатурой потребительского спроса на высококачественную продукцию все чаще предприятия-производители

сталкиваются с проблемой неполноты, ограниченности, противоречивости информации, связанной с изготовлением конкретного инновационного вида изделия. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Во-первых, зачастую заказчик не в полной мере и не до конца осознает свои потребности в необходимом и достаточном уровне показателей качества и при этом высказывает лишь желательные их значения. Во-вторых, в условиях рыночной экономики для повышения эффективности собственных производств, например, при минимизации расходных коэффициентов в процессе переработки продукции, потребитель может существенно ужесточать требования для производителя к показателям качества изделия. Причем сам диапазон значений может превышать (зашкаливать) нормируемые стандартами значения, что в свою очередь вызывает необходимость изменения настройки технологических процессов. При этом информация о требуемом уровне изменения настроек для достижения заданных значений показателей качества может быть ограничена либо полностью отсутствовать. В-третьих, к настоящему времени в научно-технической литературе недостаточно описаны и исследованы характер изменчивости показателей качества в сложных многовариантных технологических системах металлургического производства, а также факторы, влияющие на указанную изменчивость, особенно в процессах изготовления металлоизделий глубокой степени переработки.

Проблема системного анализа сложных управляемых систем позволяет определять условия устойчивого их функционирования, установить влияние параметров системы на ее устойчивость, обеспечивая заданный режим работы [13, 18]. Любую систему можно представить в виде модели, связанной с окружающей средой входными и выходными параметрами. Функционирование системы задается ее структурой. Технологический процесс – это сложная система. На практике часто возникают ситуации, когда ряд параметров технологического процесса известен, а недостающие необходимо определить. В зависимости от вида искомых величин формулируется задача исследования.

В качестве объекта исследования выберем технологию производства стальных полос горячей прокаткой, который состоит

из следующих последовательно выполняемых операций (рис. 1) [4].



*Рис. 1. Схема технологического процесса производства стального листа горячей прокаткой*

Нагретые перед прокаткой непрерывнолитые слябы поступают к черновой группе из трех реверсивных клетей. После черновой группы раскат по промежуточному рольгангу транспортируется к чистовой группе. После обрезки головной части и удаления окалины в чистовом окалиноломателе гидросбивом раскат задается в чистовую группу, состоящей из семи клетей. Скоростные режимы прокатки и режимы обжати в клетях чистовой группы должны обеспечивать необходимые энергосиловые параметры прокатки, температуру конца прокатки и геометрические размеры полосы. На рис. 2 представлена структурная схема технологического процесса производства стальной полосы горячей прокаткой.

При проектировании технологических процессов производства металлопродукции системный подход дает возможность определить взаимосвязи между параметрами, которые можно измерить, и потребительскими функциями изделия [5, 6, 14]. В свою очередь это снижает риск от принятых неверных технических решений и помогает спрогнозировать вектор развития, необходимый для изготовления высокоперспективной продукции [2, 17, 19].

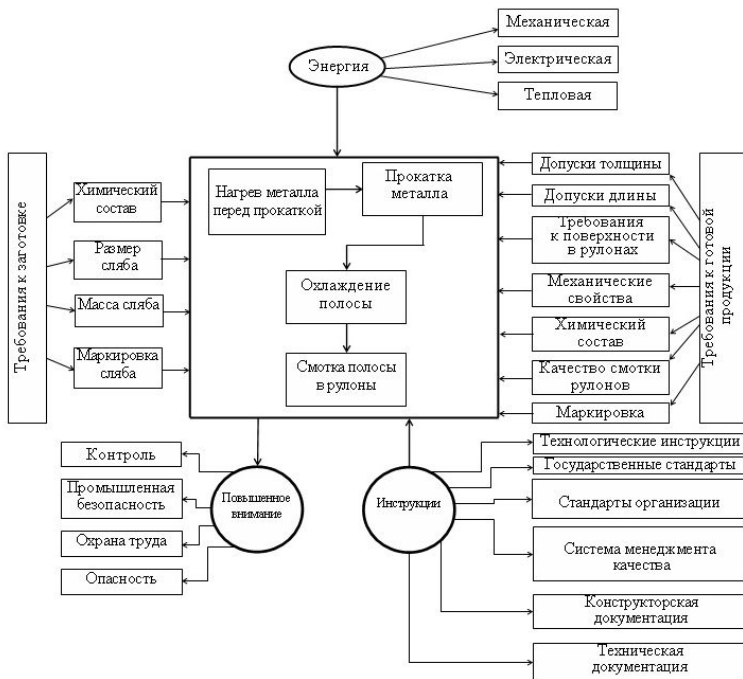


Рис. 2. Структурная схема технологического процесса горячей прокатки

Как правило, все современные математические модели, описывающие процессы формирования комплекса свойств изделий в многостадийных технологических процессах, можно разделить на однозначно определенные (детерминированные) и находящиеся в условиях неопределенности. При исследовании многооперационных процессов всегда присутствует неопределенность технологической информации, которую необходимо учитывать. Выбор методов формализации технологической информации зависит главным образом от типа неопределенности, к которому относится решаемая задача.

Использование марковских процессов позволяет решать широкий спектр технических задач. Использование математических моделей, основанных на марковских процессах, для изучения

сложных технических систем хорошо известно в различных отраслях. Высокий уровень адекватности, наглядность математической модели и проработанный математический аппарата модели марковских процессов позволяют использовать его по различным направлениям, таким как управление процессами технических систем, системами массового обслуживания, эксплуатационно-техническими свойствами (эксплуатационной надёжности и технологичности) [3, 10, 12].

Система работает как марковский процесс при условии последовательных смен состояний ее свойств и при переходе в различные состояния. Данная система может совершать переходы из одного состояния в другое только тогда, когда одни значения параметров, характеризующие это определенное состояние, сменяются следующими параметрами. Если рассматривать общий случай для оценки изменения параметров состояния контролируемых свойств в ходе технологического процесса изготовления металлопродукции, то данная система может находиться в трех состояниях:

- соответствие заданным свойствам (т.е. полное соответствие требованиям нормативных документов и заказа металлопродукции, предназначенной для поставки с учетом некоторых допусков);
- частичное соответствие заданным свойствам (продукцию считают соответствующей установленным требованиям, если несоответствия не превышают 2%);
- частичное несоответствие заданным свойствам (полученные неудовлетворительные результаты испытаний превышают 2%);
- несоответствие заданным свойствам (полученные значения полностью выходят за диапазон, установленный в нормативных документах).

Переход системы из одного состояния в другое описывается как непрерывный процесс и во времени носит случайный характер. Но поскольку состояния параметров системы контролируются в определённом интервале времени, целесообразно будет данный процесс представить как марковский с дискретным временем, переход из одного состояния в следующее у которого по времени происходит за равные интервалы [14]. Таким образом,

система наделяется таким набором значений вероятностей переходов  $p_{ij}$ , при котором эта система находится в определенный момент времени в состоянии  $i$ , а в течение следующего интервала времени она окажется в состоянии  $j$ . При анализе системы процесса непрерывной прокатки удобно будет воспользоваться размеченным графом состояний, где состояния  $S$  изображаются кружочками, а возможные переходы из одного состояния в другое – ориентированными дугами этого графа (стрелками). Переходы данной системы из  $S_i$  в  $S_j$  состояния происходит под действием потоков событий с определенными интенсивностями. Вероятности переходов в эти состояния выставляются на стрелочках. Пример переходов для системы и графа состояний, имеющего четыре обозначенных выше состояния, показан на рис. 3.

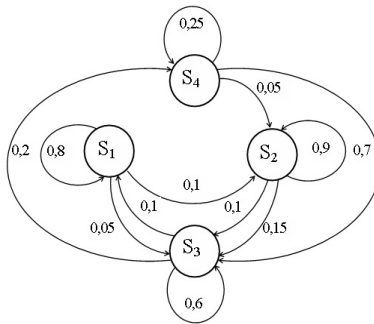


Рис. 3. Размеченный граф состояний и переходы состояний технологической системы «горячая прокатка стальной полосы»

Под состоянием системы понимается определенное достижение необходимого уровня свойств горячекатаного листа на выходе из прокатного стана:

- $S_1$  – соответствие заданным свойствам;
- $S_2$  – частичное соответствие заданным свойствам;
- $S_3$  – частичное несоответствие заданным свойствам;
- $S_4$  – несоответствие заданным свойствам.

Приведённая система принимает конечное число состояний. Также она сможет изменить свое состояние в определенный

момент времени  $t$ . Предполагаем, что в момент времени  $t$  состояние системы зависит только от состояния системы в момент времени  $t - 1$ . Считаем, что состояние системы в текущем периоде времени зависит только от её состояния в предыдущий период, т.е. мы определяем данный процесс изменения системы как цепь Маркова. Переходы из  $i$ -го в  $j$ -е состояние возможны в фиксированные моменты времени  $t$ , за которые возможна реализация любой последовательности состояний, например:

$$S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots$$

Отсюда можно увидеть, что в данной системе имеется вероятность перехода из одного состояния в следующее за конечное число шагов, что может означать существование предельных вероятностей.

Предлагаемый подход можно использовать для оценки надежности технологической системы. Как известно, надежность как одно из основных свойств при выпуске металлопродукции должна характеризовать способность выполнять необходимые функции в определенных режимах и условиях, сохраняя во времени заданные значения параметров в ограниченных пределах. Достаточное представление о качестве функционирования продукции в стабильных условиях эксплуатации вполне может дать оценка показателей надежности. Однако на производстве продукция эксплуатируется при воздействии внешних факторов окружающей среды, а значит, свойство сохранять со временем значения заданных параметров в определенных пределах и выполнять установленные функции характеризуется показателями стойкости. Таким образом, как надежность, так и стойкость являются показателями качества по характеризующим свойствам. А исходя из определений, стойкость является «частным случаем» понятия надежности, рассматриваемого в условиях внешних воздействий [7, 15, 16].

Показатели стойкости и надежности имеют вероятностный характер и отражают риск возникновения какого-либо события. Понятие риска можно определить как сочетание вероятности события и его последствий. Отсюда следует, что решение задач надежности и стойкости, а следовательно, и задач в области качества, происходит через определение риска. Взаимосвязь



понятий качества, надежности, стойкости и риска приведена на рис. 4 [1, 9].

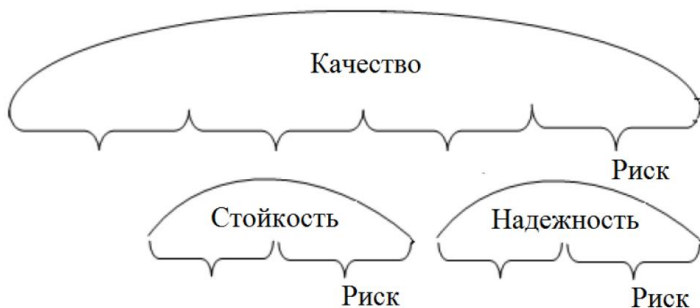


Рис. 4. Взаимосвязь качества, надежности, стойкости и риска

Таким образом, обеспечение стойкости технической системы, т.е. способности сохранять свое нормальное функционирование в процессе, а также после воздействия внешних (дестабилизирующих) факторов, однозначно является актуальным в прокатном производстве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. БАКУЛИН В.Н., МАЛКОВ С.Ю., ГОНЧАРОВ В.В., КОВАЛЕВ В.И. *Управление обеспечением стойкости сложных технических систем.* – М.: Физматлит, 2005. — 304 с.
2. ГОЛУБЧИК Э.М. *Адаптивное управление качеством металлопродукции* // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – №1(45). – С. 63–68.
3. КУЗНЕЦОВ В.И., БАРЗИЛОВИЧ Е.Ю. *Надёжность и эффективность в технике: справочник. Том 11. Эксплуатация и ремонт* / Под ред. В.И. Кузнецова, Е.Ю. Барзиловича. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
4. ПОЛЯКОВА М.А., ШИРЯЕВА Е.Н., НАЛИМОВА М.В. *Системный анализ технологического процесса горячей прокатки стальной полосы* // Известия Тульского государственного университета.

- ственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 2. – С. 360–369.
5. РУБИН Г.Ш., ДАНИЛОВА Ю.В., ПОЛЯКОВА М.А. *Системный анализ в стандартизации. Принцип системности в стандартизации* // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – №1. – С. 118–123.
  6. РУБИН Г.Ш., ДАНИЛОВА Ю.В., ПОЛЯКОВА М.А. *Системный анализ в стандартизации. Стандартизация как форма взаимодействия систем* // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 4. – С. 100–105.
  7. СИЗОВА К.Г., СКОРОБОГАТОВ П.К., ПРЫГУНОВ М.О. *Применение методов анализа надежности и риска при обеспечении, прогнозировании и оценке радиационной стойкости РЭА* // Безопасность информационных технологий. – 2018. – Т. 25, №1. – С. 52–64.
  8. СКУРИХИН В.И., ЗАБРОДСКИЙ В.А., КОПЕЙЧЕНКО Ю.В. *Адаптивные системы управления машиностроительным производством*. – М.: Машиностроение, 1989. – 208 с.
  9. СТРУКОВ А.В. *Анализ международных и российских стандартов в области надежности, риска и безопасности* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: –[http://szma.com/standarts\\_analysis.pdf](http://szma.com/standarts_analysis.pdf) (дата обращения 01.08.2021).
  10. ТИХОНОВ В.И., МИРОНОВ М.А. *Марковские процессы*. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.
  11. ФОМИН В.Н., ФРАДКОВ А.Л., ЯКУБОВИЧ В.А. *Адаптивное управление динамическими объектами*. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1981. – 448 с.
  12. ХОВАРД Р.А. *Динамическое программирование и марковские процессы*: пер. с англ. В.В. Рыкова / Под ред. Н.П. Бусленко]. – М.: Советское радио, 1964. – 189 с.
  13. ХУБКА В. *Теория технических систем*: пер. с нем. – М.: Мир, 1987. – 208 с.
  14. ШИРЯЕВА Е.Н., ПОЛЯКОВА М.А. *Анализ подходов к оценке надежности технических систем* // Вестник современных технологий. – 2019. – №3(15). – С. 9–16.
  15. ШИРЯЕВА Е.Н., ПОЛЯКОВА М.А. *Анализ подходов к оценке надежности технических систем. Современные материалы и технологии новых поколений* // Сборник

- научных трудов II Международного молодежного конгресса / Под ред. А.Н. Яковлева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – С. 362–363.
16. ШИРЯЕВА Е.Н., ПОЛЯКОВА М.А. *Особенности оценки надежности технологических и технических систем в действующей нормативной документации* // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т. 17, №3. – С. 60–69.
  17. ШИРЯЕВА Е.Н., ПОЛЯКОВА М.А., ГОЛУБЧИК Э.М. *Предпосылки выбора метода оценки надежности технологического процесса горячей прокатки* // Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний: сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Рудненского индустриального института. – Рудный: Рудненский индустриальный институт, 2019. – С. 596–604.
  18. ШЛЕЕР С., МЕЛЛОП С. *Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях*: пер. с англ. – Киев: Диалектика, 1993. – 240 с.
  19. SHIRIAEVA E.N., POLYAKOVA M.A., GOLUBCHIK E.M. *Prerequisites to Choose the Method for Dependability Assessment of Hot Rolling Process* // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2020. – Vol. 55, No. 3. – P. 681–686.

## DEVELOPMENT THE MODEL FOR MANAGEMENT OF STEEL SHEET HOT ROLLING PROCESS UNDER CONDITIONS OF INFORMATION UNCERTAINTY

**Michail Chukin**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Doctor of Science, professor (m.chukin@mail.ru).

**Marina Polyakova**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Doctor of Science, assistant professor (m.polyakova@magtu.ru).

**Elena Shiryaeva**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, PhD student (e.shiryaeva@magtu.ru).

*Abstract. Manufacturing processes with complicated multioperational technological impact on the processing metal ware product have been increasingly spread in the metallurgical branch. Especially it is actual for metal ware product related to the final stages of the branch. In fact, sufficient experience is accumulated to formalize the operation and description of such technological systems which makes it possible to carry out the automatic design of industrial complexes. Formalization of behavior of complicated systems is based on their presentation in the form of multilevel or hierarchical systems with solving the tasks of optimization. At the same time, to solve the task it is proposed to use decomposition methods which consist in the dividing the basic complicated system to structural elements, finding the independent solutions for each of them, and further combination of these subtotal solutions into the whole determination of the starting task. Main advantage of Markov's processes is the possibility to carry out the forecasting-and-management models of the object behavior or a group of objects in time based on statistical data or results of exploitation observations. In most cases the Markov's process is presented as the model with probability structure which allows to determine for the object the probability to appear in one state of the process during the definite time or time interval. Application of the proposed approach ensures the reliability of the technological system to manufacture product with the desired level of quality and functional properties.*

Keywords: technological process, metal ware, system analysis, information uncertainty, Markov process.

УДК 669-122.4 + 519.248

ББК 34.53 + 2.171