

УДК 681.5.011

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ШТАМПОВКОЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

<sup>1</sup>Гавариев Р.В., <sup>2</sup>Гавариева К.Н.

<sup>1</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева, Казань, e-mail: GavarievR@mail.ru;*

<sup>2</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, e-mail: Gavarievakn@mail.ru*

В статье приведены результаты математического моделирования системы управления устройства индукционного нагрева заготовок, устройства исключения брака после нагрева поковки технологического процесса горячей объемной штамповки зубчатых конических колес посредством конечных автоматов. Конечные автоматы широко применяются в теории формальных языков при осуществлении автоматного подхода к программированию, а также при взаимосвязи алгоритмов логического управления. Для формирования определенного функционирования алгоритмов синтезированные конечные автоматы должны быть детерминированными. Применение указанного математического аппарата позволяет просмотреть единую логику управления процессом горячей объемной штамповки, который объединяет множество взаимодействующих подсистем для выполнения общего задания. В результате предлагается такая методика, которая позволила бы на этапе проектирования и разработки технологического процесса горячей объемной штамповки четко представить логику диспетчерского управления, определения и реагирования на ошибки при работе, в виде конечно-автоматной сети функционирования всех подсистем комплекса. В качестве предмета исследования выступает структура системы управления технологическим процессом горячей объемной штамповки конических колес, состоящим из автоматизированного оборудования для горячей штамповки, устройства индукционного нагрева заготовок, устройства подачи заготовок, устройства сортировки бракованных поковок и промышленного робота-манипулятора.

**Ключевые слова:** горячая объемная штамповка, индукционный нагрев, конечные автоматы, система управления, математическое моделирование

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR PRECISION STAMPING BASED ON MATHEMATICAL MODELING

<sup>1</sup>Gavariiev R.V., <sup>2</sup>Gavariieva K.N.

<sup>1</sup>*Kazan National Research Technical University A.N. Tupolev, Kazan, e-mail: GavarievR@mail.ru;*

<sup>2</sup>*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, e-mail: Gavarievakn@mail.ru*

The article presents the results of mathematical modeling of the control system of the device for induction heating of workpieces, the device for eliminating defects after heating the forging of the technological process of hot volume stamping of bevel gears by means of finite state machines. Finite automata are widely used in the theory of formal languages in the implementation of an automatic approach to programming, as well as in the relationship of logical control algorithms. To form a certain functioning of algorithms, synthesized finite automata must be deterministic. The use of this mathematical tool allows you to view a single logic for controlling the process of hot forging, which combines a set of interacting subsystems to perform a common task. The result is a methodology that would allow at the stage of design and development of technological process of die forging to be clear about the logic Supervisory control, measurement and response errors in the form of course the automatic network of functioning of all subsystems of the complex. The subject of research is the structure of the control system for the technological process of hot forging of conical wheels, which consists of automated equipment for hot stamping, induction heating of workpieces, a device for feeding workpieces, a device for sorting defective forgings and an industrial robot-manipulator.

**Keywords:** hot forging, induction heating, finite automata, control system, mathematical modeling

Согласно исследованиям иностранных ученых, процесс горячей объемной штамповки (ГОШ) конических зубчатых колес без дополнительной токарной обработки является технологически и экономически эффективным. При производстве на кузнечно-прессовом оборудовании конических колес с одновременным формообразованием зубьев с применением метода точной объемной штамповки снижаются затраты на изготовление изделий на 10–12% [1]. Однако горячая объемная штамповка является сложным производственным про-

цессом, зависящим от множества факторов (температура заготовки и штампа, закрытая высота штампа, усилие штамповки, объем заготовки).

Для получения качественных зубчатых конических колес необходимы контроль и регулировка указанных параметров. Реализация данной задачи возможна за счет использования средств автоматизации, позволяющих вносить коррективы, не останавливая производственный процесс. Математические модели нашли широкое применение при проектировании дискрет-

ных производственных систем, таких как горячая объемная штамповка. При формировании структурных схем и алгоритмов функционирования подобных комплексов оптимально использование метода конечных автоматов [2; 3].

Цель исследования – проведение математического моделирования системы управления устройства индукционного нагрева заготовок, устройства исключения брака после нагрева поковки технологического процесса горячей объемной штамповки зубчатых конических колес посредством конечных автоматов.

#### *Описание организационной структуры*

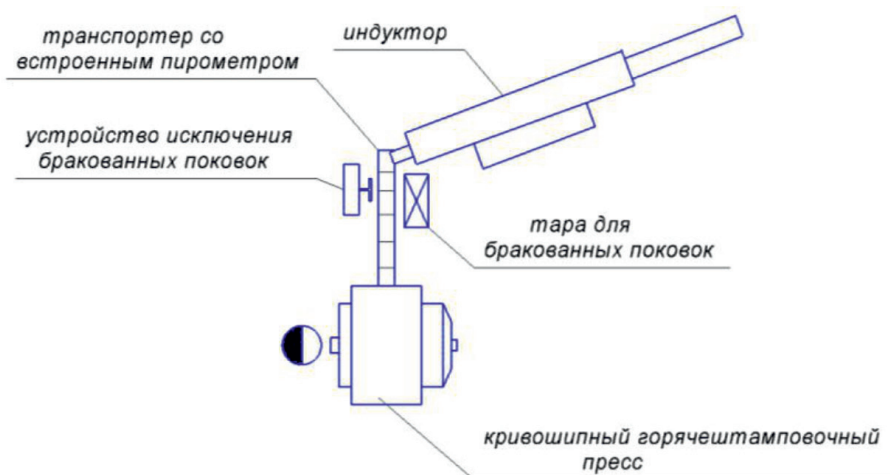
Производство зубчатых конических колес методом прецизионной штамповки начинается с индукционного нагрева заготовок до температуры штамповки, равной 1051–1150 °С. После нагрева заготовка движется по транспортеру пластинчатому, оснащеному пирометром. Пирометр замеряет температуру заготовки. В случае если температура заготовки находится в диапазоне 850–1050 °С или 1201–1270 °С, срабатывает отсекающий механизм, который сталкивает бракованные заготовки в тару. Если же температура заготовки находится в диапазоне 1151–1200 °С, срабатывает блокиратор, приостанавливающий транспортировку поковки в зону штампа [4]. Оптимальной температуры поковки поступают в рабочую зону штампа формообразующего. При этом с помощью высотомера выполняется замер высотного размера заготовки, от которого производится регулировка закрытой высоты штампа. Компонентная структура

технологического процесса представлена на рисунке.

#### *Моделирование работы подсистем технологического процесса ГОШ*

Автоматизированное управление технологическим процессом ГОШ зубчатых конических колес характеризуется сложным технологическим поведением. Поэтому рациональным будет применение такого метода управления технологическим процессом точной штамповки зубчатых конических колес, который в первую очередь регулировал бы потоки производственной системы и координировал рабочие циклы оборудования производственной системы для выполнения заданного технологического процесса [5].

Логико-программное управление позволяет решать такого типа задачи, а с помощью теории конечных автоматов и графов функционирования можно выполнить формализованное описание технологического процесса. Синтез системы логико-программного управления формируется по блокам, выделяя воздействия на каждый исполнительный механизм. Основная задача синтеза систем логико-программного управления состоит в формировании алгоритмической структуры блоков командных и управляющих сигналов, т.е. необходимо представление последовательности смены дискретных состояний производственной системы. Для формирования выводов команд управления перевода процесса в требуемое состояние и описания последовательности действий согласно логическим сигналам о положении управляемого техпроцесса составляют алгоритм программного управления [6; 7].



*Компоновочная схема участка горячей объемной штамповки зубчатых конических колес*

Основной задачей логико-программно-го управления является стабилизация отклонений протекающего процесса от запланированного, что в конечном итоге влияет на обеспечение выполнения плана выпуска готовой продукции, обеспечение эффективного использования оборудования, сокращение длительности производственного цикла и объема незавершенного производства [8].

Рассмотрим представление логико-программного управления технологического процесса горячей объемной штамповки зубчатых конических колес в виде конечного автомата.

Конечный автомат представляет собой математическую модель  $S = \{A, Q, V, \delta, \lambda\}$ , где  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$ ,  $Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ ,  $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_k\}$  – это конечные множества (алфавиты),  $A$  – множество входных логических сигналов,  $V$  – множество выходных логических сигналов,  $Q$  – множество внутренних состояний автомата,  $\lambda$  – функция выходов,  $\delta$  – функция переходов [9; 10].

Таблицы функций переходов и выходов являются алгоритмами конечных автоматов процессов и состояний процессов. Период активации состояний процесса служит тактом для конечных автоматов [11].

В табл. 1 приведена функция переходов и выходов конечного автомата индукционного нагрева заготовок.

**Таблица 1**

Функция переходов и выходов конечного автомата индукционного нагрева заготовок

	$a_1$	$a_2$
$q_0$	$q_1 V_1$	$q_0 V_0$
$q_1$	$q_1 V_1$	$q_0 V_0$

Алгоритм работы конечного автомата индукционного нагрева:

1. Блок вывода управляющей команды отображает сообщение  $a_1$  – «Запустить процесс нагрева заготовок».

При активности сигнала пуска конечный автомат из состояния  $q_0$  – «Процесс

не активен» переходит в состояние  $q_1$  – «Процесс нагрева заготовок» путем выдачи команды  $v_1$  – «Процесс нагрева заготовок».

При активности сигнала пуска конечный автомат в состоянии  $q_1$  – «Процесс нагрева заготовок» остается в этом же состоянии и выдает команду  $v_1$  – «Процесс нагрева заготовок активный».

2. Блок вывода управляющей команды отображает сообщение  $a_2$  – «Остановить процесс нагрева заготовок».

При активности сигнала пуска конечный автомат в состоянии  $q_0$  – «Процесс не активен» остается в этом же состоянии и выдает команду  $v_0$  – «Процесс нагрева заготовок не активен».

При активности сигнала пуска конечный автомат из состояния  $q_1$  – «Процесс нагрева заготовок» переходит в состояние  $q_0$  – «Процесс не активен» путем выдачи команды  $v_0$  – «Процесс нагрева заготовок не активен».

Функция переходов и выходов конечного автомата блокиратора-отсекателя представлена в табл. 2.

Алгоритм работы конечного автомата блокиратора-отсекателя:

1. Блок вывода управляющей команды отображает сообщение  $a_1$  – «Температура заготовки 850–1050 °С, запустить процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель».

При активности сигнала пуска конечный автомат из состояния  $q_0$  – «Начальное положение устройства исключения бракованных поковок» переходит в состояние  $q_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» путем выдачи команды  $V_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель».

При активности сигнала пуска конечный автомат в состоянии  $q_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» остается в этом же состоянии и выдает команду  $V_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель активный».

**Таблица 2**

Функция переходов и выходов конечного автомата устройства исключения бракованных поковок

	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$
$q_0$	$q_1 V_1$	$q_1 V_2$	$q_3 V_3$	$q_3 V_2$
$q_1$	$q_1 V_1$	$q_1 V_2$	$q_0 V_0 \rightarrow q_1 V_{2n}$	$q_0 V_0 \rightarrow q_1 V_{2n}$
$q_2$	$q_0 V_0 \rightarrow q_1 V_n$	$q_0 V_0 \rightarrow q_1 V_{2n}$	$q_3 V_3$	$q_2 V_{3n+1}$

Конечный автомат из состояния  $q_2$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор» при воздействии сигнала пуска переходит в состояние  $q_0$  – «Начальное положение устройства исключения бракованных поковок» путем выдачи команды  $V_0$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в начальном положении» и переходит в состояние  $q_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» при управляющей команде  $V_n$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель активное».

2. Блок вывода управляющей команды отображает сообщение  $a_2$  – «Температура заготовки 1201–1270 °С, запустить процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель».

При активности сигнала пуска конечный автомат из состояния  $q_0$  – «Начальное положение устройства исключения бракованных поковок» переходит в состояние  $q_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» путем выдачи команды  $V_2$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель».

Конечный автомат в состоянии  $q_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» при поступлении команды,  $v_2$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель активный» и остается в этом же состоянии.

Конечный автомат из состояния  $q_2$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор» переходит в состояние  $q_0$  – «Начальное положение устройства исключения бракованных поковок» при воздействии команды  $v_0$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в начальном положении» и переходит в состояние  $q_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» путем выдачи команды  $V_{2n}$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель активный».

3. Блок вывода управляющей команды отображает сообщение  $a_3$  – «Температура заготовки 1151–1200 °С, запустить процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокировка».

Если конечный автомат находится в состоянии  $q_0$  – «Начальное положение устройства исключения бракованных поковок», то при управляющем активном сигнале конечный автомат переходит в состояние  $q_2$  – «Процесс движения устройства исклю-

чения бракованных поковок в режиме блокиратор» при команде  $V_3$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор».

При активности сигнала пуска конечный автомат из положения  $q_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» переходит в состояние  $q_0$  – «Начальное положение устройства исключения бракованных поковок» путем выдачи команды  $v_0$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в начальном положении» и переходит в состояние  $q_2$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» при команде  $V_{3n}$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор активный».

Конечный автомат остается в состоянии  $q_2$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор» при выводе команды  $V_{3n}$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор активный».

4. Блок вывода управляющей команды отображает сообщение  $a_4$  – «Температура заготовки 1151–1200 °С, запустить процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокировка 5 сек.».

Конечный автомат из состояния  $q_0$  – «Начальное положение устройства исключения бракованных поковок» переходит в состояние  $q_3$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор» при активном сигнале пуска и выдаче команды  $V_3$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор».

Конечный автомат из состояния  $q_1$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» переходит в состояние  $q_0$  – «Начальное положение устройства исключения бракованных поковок» при команде  $v_0$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в начальном положении» и переходит в состояние  $q_2$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме отсекабель» путем выдачи команды  $V_{3n}$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор активный».

Конечный автомат остается в состоянии  $q_2$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор» при активности сигнала пуска путем выдачи команды  $V_{3n+1}$  – «Процесс движения устройства исключения бракованных поковок в режиме блокиратор 5 сек. активный».



### Заключение

Изготовление конических зубчатых колес является сложным процессом, анализ функционирования которого может быть описан методом конечных автоматов. Корректировка процесса штамповки может быть осуществлена путем нагрева индуктора, а также отсечением бракованных заготовок. В этом случае наиболее оптимальным параметром, который влияет на конечные положения управляющих устройств, является температура заготовки. В результате в данной статье представлены основные положения разработки системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес и основные результаты, которые могут быть использованы при процессе проектирования работы данного процесса в современных системах компьютерного моделирования.

### Список литературы

1. Охрименко Я.М. Полезное действие трения в процессах штамповки, прессования и выдавливания // Кузнечно-штамповочное производство 1981. № 6. С. 17–20.
2. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 400 с.
3. Руднев В.В. Конечный автомат как объект управления // Автоматика и телемеханика. 1978. № 9. С. 126–135.
4. Gavarieva K.N., Simonova L.A., Pankratov D.L., Gavariev R.V. Development of expert systems for modeling of technological process of pressure casting on the basis of artificial intelligence. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. September 2017. Institute of Physics Publishing. DOI: 10.1088/1757-899x/240/1/012019.
5. Максимов А.А. Один подход к построению конечно-автоматной управляющей сети // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2012. № S6. С. 14–29.
6. Иванов В.А., Медведев В.С. Математические основы теории оптимального и логического управления. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 599 с.
7. Gavarieva K.N., Simonova L.A., Pankratov D.L., Shibakov V.G., Gavariev R.V. Application of multi-agent system for control of parameters of precision stamping process of bevel gears. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 412. DOI: 10.1088/1757-899X/412/1/012020.
8. Shaparev A.V., Savin I.A. Calculation of Joint Plastic Deformation to Form Metal Compound in Cold Condition. Solid State Phenomena. 2017. Vol. 265. P. 313–318. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.265.313.
9. Бухаров М.Н. Использование теории конечных автоматов для управления сложными системами // Информационно-технологический вестник. 2015. № 1(03). С. 31–46.
10. Кибкало М.А. Об автоматной сложности классов поста булевых функций // Интеллектуальные системы. 2011. Т. 15. № 1–4. С. 379–400.
11. Гавариева К.Н., Симонова Л.А. Разработка базы знаний для системы нечеткого логического вывода процесса прецизионной штамповки // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 1. С. 62–64.