



Соловьев В. А., Дерюжкова Н. Е., Чжо Аунг Хтет  
V. A. Solovyov, N. Ye. Deryuzhkova, Kyaw Aung Htet

## К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ВЗАИМОСВЯЗАННОЙ СИСТЕМЫ ОБЪЕМНОГО ФОРМОВАНИЯ

## ON THE MATHEMATICAL MODEL OF THE OBJECT FOR INTERCONNECTED SYSTEM IN BULK FORMING

**Соловьев Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Mr. Vyacheslav A. Solovyov** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the department of electrical machine and automation of industrial plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Дерюжкова Нелли Егоровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Ms. Nelli Ye. Deryuzhkova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of electrical machine and automation of industrial plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Чжо Аунг Хтет** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: luckyboykah7@gmail.com.

**Kyaw Aung Htet** – a post-graduate student, Department of electrical machine and automation of industrial plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: luckyboykah7@gmail.com.

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объемного формования. Процесс формования можно считать как процесс изгиба и придания листовому материалу определенной кривизны, который позволяет существенно сократить издержки на механообработку и временные затраты на последующих этапах изготовления изделия. Оптимизация режимов формовки должна предусматривать предварительные исследования. Проведение исследований на реальном объекте затруднительно, поэтому целесообразно процесс исследования перевести в область моделирования. Управляющее звено в формовании представляет собой многодвигательный электропривод, реализуемый по схеме замкнутой системы регулирования, а силовое воздействие на листовую материал вынуждает рассматривать систему управления электроприводами как взаимосвязанную. В приближении через параметры узла изгиба получена разработанная математическая модель объекта. По разработанной математической модели объекта структурная схема объекта регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования представлена в среде MatLab-Simulink.

**Summary.** In this article, questions of the mathematical model of the object for interconnected system in bulk forming are considered. The forming process can be considered as a bending process and obtaining a specific curvature of sheet metal that can significantly reduce the cost of machining and time spent on subsequent stages of the product manufacture. Optimization methods of forming must be provided for preliminary research. The research with the real object is difficult and therefore expediently research will be conducted in modeling environment. Control link of forming process can be configured as a multi-motor electric drive that is implemented according to the scheme of the closed-loop control system and the acting force on the sheet material represents the control system of electric drives as the interconnected system. In the approximation through the parameters of the bending process, the developed mathematical equation of the object is obtained. According to the developed mathematical model of control object, the structural diagram of the object regulation of the three-point bending for the interconnected control system is presented in the MatLab- Simulink environment.

**Ключевые слова:** взаимосвязанная система, математическая модель, объемное формирование, изгиб.

**Key words:** Interconnected system, mathematical model, bulk forming, bending.

УДК 621.771

В конструкциях целого класса изделий машиностроительного производства широко применяются крупногабаритные металлические детали двойной кривизны. Как правило, изготовление таких изделий осуществляется путем формования из листового материала. Придание листовому материалу определенной кривизны позволяет существенно сократить издержки на механообработку и временные затраты на последующих этапах изготовления изделия. Для крупногабаритных изделий наиболее приемлемым способом обработки давлением следует признать способ высокотемпературной многоточечной формовки, при котором на заготовку при определённой температуре воздействует массив независимо движущихся стержней [1-4]. Процесс формообразования зависит от множества разнородных факторов: свойств материала, температуры, скорости изменения прикладываемого усилия и др. Поэтому оптимизация режимов формовки должна предусматривать предварительные исследования. Однако проведение исследований на реальном объекте затруднительно из-за единичности и уникальности такой установки, а изготовление опытной установки – дорогостоящее мероприятие. Поэтому целесообразно процесс исследования перевести в область моделирования.

При постановке задачи будем полагать, что формуемая заготовка представляет собой лист сравнительно большой толщины. Формующие стержни располагаются в виде равномерно распределенной матрицы оппозитно с двух сторон заготовки (см. рис. 1). Привод перемещения стержней выполнен на базе автономных частотно-регулируемых электроприводов. Преобразование вращательного движения в поступательное осуществляется с помощью типовой шарико-винтовой пары (актуатора).

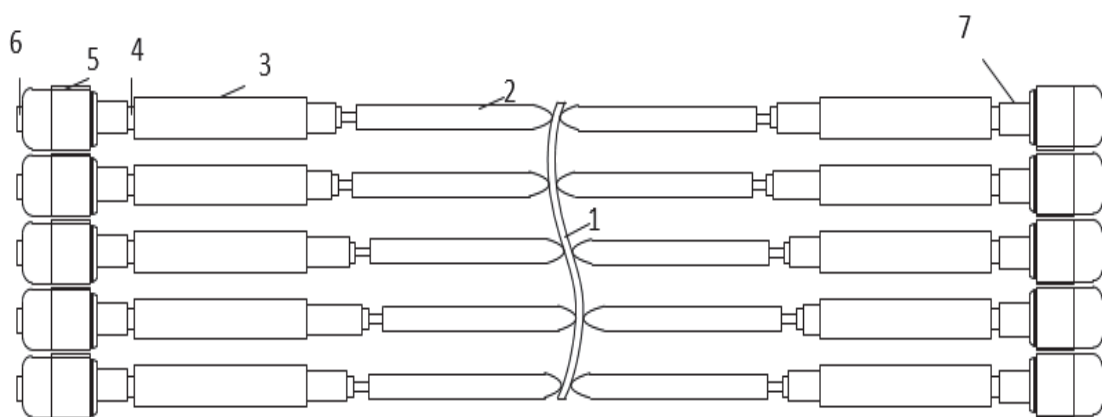


Рис. 1. Схематичное расположение формирующих стержней: 1 – заготовка; 2 – стержень; 3 – актуатор; 4 – датчик положения; 5 – двигатель; 6 – датчик скорости; 7 – редуктор

Для придания заготовке требуемой формы управление приводами стержней должно быть индивидуальным, в то же время наличие общего объекта силового воздействия вынуждает рассматривать систему управления электроприводами как взаимосвязанную. Базовым звеном, обеспечивающим придание заготовке желаемой кривизны, является комбинация взаимодействия трех стержней. Сам процесс формования можно считать как процесс изгиба, который схематично можно изобразить в виде, показанном на рис. 2.

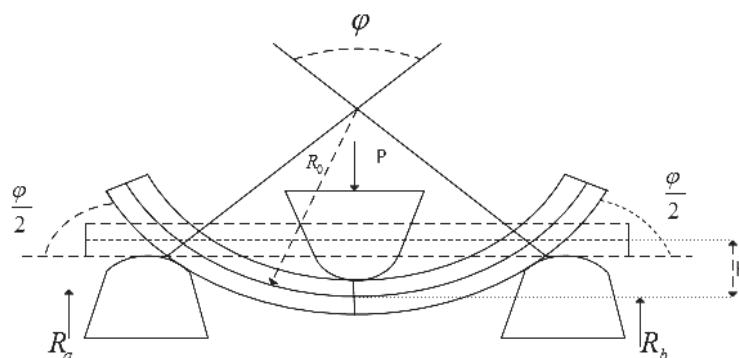


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая процесс изгиба:  $R_0$  – условный центральный радиус;  $\varphi$  – центральный угол изгиба;  $h$  – величина прогиба (линейное перемещение формирующих стержней);  $P$  – усилие воздействующее на заготовку;  $R_a, R_b$  – противодействующие усилия на oppositно расположенных стержнях

При перемещении центрального стержня на величину  $\Delta h$  со стороны заготовки на него будет действовать сила сопротивления, которая будет зависеть как от размеров заготовки, так и от свойств материала заготовки [5]

$$\Delta P = \frac{\sigma_s \frac{B s^2}{4} + \frac{\Pi}{R_0} \frac{B s^3}{12}}{\frac{l}{4} + \frac{\Delta h}{4} \frac{\operatorname{tg}(\frac{\varphi}{2}) - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg}(\frac{\varphi}{2})}}, \quad (1)$$

где  $s$  – толщина заготовки, м;  $B$  – размер заготовки, подвергаемый изгибу и измеряемый в перпендикулярном отношении к оси расположения oppositно расположенных стержней, м;  $R_0$  – центральный радиус изгиба, м;  $l$  – расстояние между осями oppositно расположенных стержней, м;  $\sigma_s$  – модуль пластичности материала;  $\Pi$  – модуль упрочнения материала;  $\mu$  – коэффициент трения между стержнем и заготовкой.

При выводе данного соотношения полагалось, что толщина слоя, подвергающаяся немонотонной деформации, незначительна, а радиус изгиба больше трехкратного значения толщины заготовки.

Угол изгиба  $\varphi$  в процессе формирования заготовки изменяется от нулевой величины до некоторого конечного значения, определяемого линейным перемещением. В первом приближении  $\operatorname{tg}\varphi/2$  можно выразить через параметры узла формирования  $\operatorname{tg}\varphi/2 = 2\Delta h/l$ . Тогда выражение (1) примет вид

$$\Delta P = \frac{\sigma_s \frac{B s^2}{4} + \frac{\Pi}{R_0} \frac{B s^3}{12}}{\frac{l}{4} + \frac{\Delta h}{2} \frac{2 \Delta h / l - \mu}{1 + \mu 2 \Delta h / l}}.$$

Необходимо отметить, модуль пластичности материала зависит не только от свойств материала, но и от температуры, при которой происходит формирование. Данную зависимость можно получить на основании экспериментальных данных. Характер такой зависимости для сплава 7075 в качестве примера показан на рис. 3.

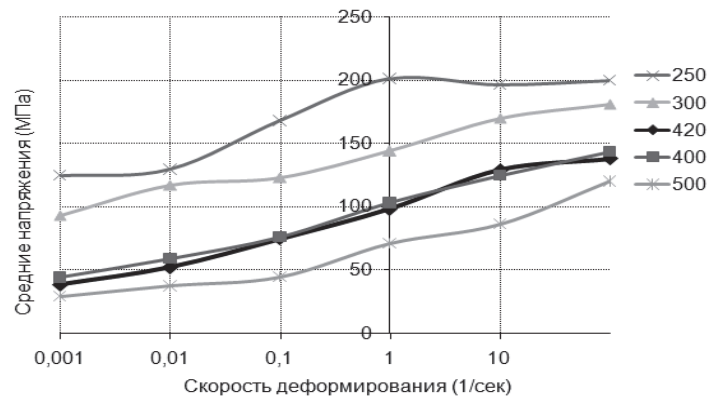


Рис. 3. Зависимость напряжений от скорости деформирования при разных температурах для сплава 7075

Полагая, что электроприводы перемещения стержней выполнены в виде сервоприводов переменного тока, тогда структурную схему объекта регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования в среде MatLab можно представить в виде, приведенном на рис. 4.

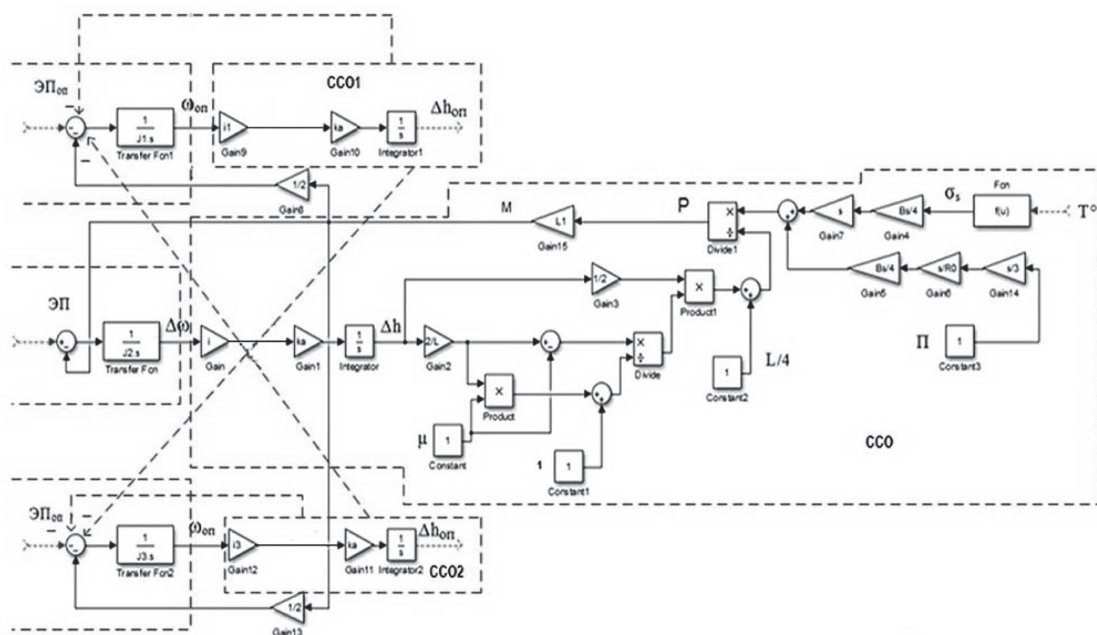


Рис. 4. Структурная схема объекта регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования в среде MatLab: ССО – структурная схема объекта; ССО1 – структурная схема объекта 1; ССО2 – структурная схема объекта 2; ЭП – электропривод; ЭП<sub>оп</sub> – опорный электропривод

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ 2251464, В 21 D 11/20. Устройство формования / Клопотов И. Д., Любашевская И. В., Раевская Г. А., Рублевский Л. Л., Соснин О. В.; опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13.
2. Патент РФ № 2216422. Формообразующее устройство / Гусев Г. А., Любашевская И. В., Рублевский Л.Л.; опубл. 20.11.2003.
3. Патент РФ № 2275267. Формообразующее устройство / Любашевская И. В., Рублевский Л. Л.; опубл. 27.04.2006.
4. А. с. СССР № 1147471. Способ формообразования деталей двойной крутизны и устройство для его осуществления / Соснин О. В., Шубин И. А., Горин В. В., Раевская Г. А.; опубл. 30.03.1985. БИ № 12.
5. Горбунов, М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов / М. Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1970.