УДК
621.531.3

Л.Б. Алексеева

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МЕХАНИЗМОВ ВЫТЯЖКИ СТЕКЛЯННЫХ СТЕРЖНЕЙ

Рассмотрен типовой процесс изготовления световодов (стеклянных стержней). При их изготовлении применяется метод вытягивания из фильеры или метод перетягивания из заготовки, конец которой размягчен под действием температуры. Эти задачи решаются с помощью механизмов вытяжки. Для исследования процессов, происходящих при вытяжке, используется математическая модель, включающая три группы уравнений: неразрывности, равновесия и физическое, описывающее состояние стекломассы. На основе принятой модели дана оценка статических свойств объекта управления, определяющих чувствительность зоны формирования к возмущениям технологических параметров. Она позволяет в зависимости от требований к точности геометрии вытягиваемого световода определять точность поддержания технологических параметров на заданном уровне: скорости вытяжки, температуры нагрева стекломассы (ее вязкости), усилия вытяжки. Рассмотрены основные типы механизмов вытяжки. Предложены схемы, расширяющие рамки рассмотренной классификации механизмов вытяжки. Проведенные исследования позволили сформулировать направления совершенствования установок вытяжки для автоматизированного производства световодов.
Ключевые слова: математическая модель, контроль, скорость, вытяжка, световод, зона формирования, установка, объект, метод, технологические параметры.

Введение

Для каждого типа волоконной детали (одножильные и многожильные жесткие световоды, гибкие волокна и жгуты для передачи света или для передачи изображения, технические эндоскопы, используемые при диагностики двигателей и других сложных систем) требуется своя специфическая технология производства. Во всех технологических процессах неизменно присутствует операция изготовления одножильных стержней (световодов). Это могут быть полые трубки, тонкие штабики с диаметром поперечного сечения 0,5...2 мм. При их изготовлении применяется метод вытягивания из фильеры или метод перетягивания из заготовки, конец которой размягчен под действием температуры. Эти задачи решаются с помощью механизмов вытяжки.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 16–22.
© 2017. Л.Б. Алексеева.

Проблема автоматизации процесса вытяжки оптических стержней (световодов) заключается в том, что их качество зависит от множества физических и технологических факторов, оптимальное значение которых обеспечивается системой управления процессом вытяжки. Учет влияющих факторов в реальных процессах является задачей с высоким уровнем неопределенности.

Объектом исследований в работе принята обобщенная (идеализированная) схема автоматизированной установки вытяжки световодов. Для такой схемы разработаны математические модели. Главная задача, решаемая с помощью этих моделей, – создание методов оценки управляющих воздействий, учитывающих характеристики объекта управления и влияние всех значимых факторов на качество вытягиваемого световода. Прежде всего, это касается основных технологических параметров: температуры разогрева стекломассы (ее вязкости), скорости подачи стекла в зону нагрева, скорости и усилия вытяжки световода. Решение поставленных задач оказалось возможным, поскольку автором работы найдены методики, позволяющие установить состояние объекта управления при известных возмущающих и управляющих воздействиях.

Выбор модели процесса

Проведенный анализ позволил установить, что стабильность геометрии световода определяется [1]:

- физическим состоянием размягченной стекломассы, из которой вытягивается световод;
- стабильностью условий в зоне формирования;
- кинематическими и динамическими параметрами установок вытяжки.

Физическое состояние стекломассы в зоне формирования определяет условия стабильного протекания процесса вытяжки и величины «откликов» на различные возмущающие и управляющие воздействия.

Процесс образования геометрии световода происходит в зоне формирования, которая представляет собой переход от разогретой стекломассы к световоду $0 \le z \le L$, где L – длина зоны формирования, которая представляет собой тело вращения.

Для исследования процессов, происходящих в зоне формирования, предлагаются математические модели, включающие три группы уравнений: уравнение неразрывности, равновесия сил и физические, описывающие состояние стекломассы [2].

Зона формирования представляет собой тело вращения. Поэтому используется цилиндрическая система координат. В силу

осевой симметрии зоны формирования достаточно двух координат z, r

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial(S\upsilon)}{\partial z}=0;\\
&\rho\left[\frac{\partial(\upsilon S)}{\partial t}+\frac{\partial(\upsilon^2 S)}{\partial z}\right]=\rho S g+\frac{\partial(pS)}{\partial z};\\
&p+\lambda\left(\frac{\partial p}{\partial t}+\upsilon\frac{\partial p}{\partial z}\right)=3\mu\frac{\partial\upsilon}{\partial z},
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где t – время; υ, p – соответственно скорость и напряжение в рассматриваемом сечении зоны формирования; S – площадь рассматриваемого сечения; ρ – плотность стекломассы, которая полагается постоянной; μ – динамическая вязкость стекломассы; $\lambda = \mu/G$ – время релаксации; G – модуль упругости стекломассы.

На основе принятой модели дана оценки статических свойств объекта управления, определяющих чувствительность зоны формирования к возмущениям технологических параметров. Она позволяет в зависимости от требований к точности геометрии вытягиваемого световода определять точность поддержания технологических параметров на заданном уровне: скорости вытяжки, температуры нагрева стекломассы (ее вязкости), усилия вытяжки. При этом показано, что допуски на отклонения технологических параметров взаимосвязаны.

Механизмы вытяжки

При всем многообразии схем механизмов вытяжки можно выделить три тесно связанных между собой конструктивных направления:

- создание устройств, обеспечивающих стабильные условия в зоне формирования;
- совершенствование одного из основных механических узлов – механизмов вытяжки;
- создание устройств, обеспечивающих непрерывный контроль и корректировку параметров процесса.

Существующие механизмы вытяжки можно разделить на группы по типу передач, используемых для преобразования вращательного движения привода в поступательное перемещение вытягиваемого стержня: фрикционные, ременные, с передачей винт-гайка, с цепной передачей, с комбинацией различных передач. В настоящее время одним из основных критериев

при выборе типа механизма вытяжки является способность его обеспечить высокую равномерность скорости вытягивания.

Исторически первыми стали применяться механизмы вытяжки с фрикционными передачами. Их работа основана на использовании сил трения, возникающих в месте контакта тел вращения и стержня. При этом создается сила вытягивания

$$F_в = Q\, f\, k^{-1},$$

где Q – сила поджатия тел вращения; f – коэффициент трения скольжения; k – коэффициент запаса сцепления.

Усилие вытяжки, которое может обеспечить ременная передача

$$F_в = 2\, S_0\, \frac{e^{f\alpha} - 1}{e^{f\alpha} + 1},$$

где S_0 – предварительное натяжение ремней; f – коэффициент трения между ремнем и шкивом; α – угол охвата ремнем шкива.

Упругое скольжение в ременной передаче является причиной непостоянства передаточного отношения.

Однако при режиме работы, близком к режиму холостого хода, упругое скольжение практически равно нулю. Такой режим обеспечивается при соотношении $S_0 > 10F_в$. Но при увеличении предварительного натяжения ремня уменьшается его долговечность. Кроме того, ремень интенсивно вытягивается в период его эксплуатации.

Упругое скольжение в ременной передаче является причиной непостоянства передаточного отношения. Однако при режиме работы, близком к режиму холостого хода, упругое скольжение практически равно нулю. Такой режим обеспечивается при соотношении $S_0 > 10F_в$. Но при увеличении предварительного натяжения ремня уменьшается его долговечность. Кроме того, ремень интенсивно вытягивается в период его эксплуатации.

Винтовая передача обеспечивает возможность достижения высокой точности перемещения. Существенный недостаток передачи винт-гайка – большие потери на трение, обусловленные большими скоростями скольжения в резьбе $\upsilon_c = \upsilon_в / \sin\psi$, где $\upsilon_с$ – скорость скольжения; $\upsilon_в$ – скорость вытягивания стержня; ψ – угол подъема резьбы.

Обычно $\upsilon_с = (10 \div 40)\upsilon_в$. Большие скорости скольжения в этой передаче при относительно небольшой полезной нагрузке неизбежно вызывают непостоянство сил сопротивления. Это приводит в итоге к неравномерности скорости вытягивания.

Большое распространение получили механизмы вытяжки с цепной передачей [3]. Основные причины, которые могут вы-

звать неравномерность скорости вытягивания в таких механизмах: гранность звездочек (цепь располагается на звездочке не по окружности, а по многоугольнику), разноразмерность звеньев цепи, эксцентриситет звездочек.

Гранность звездочек приводит к неравномерности скорости вытягивания, оцениваемой коэффициентом μ

$$\mu = 2\ \frac{1-\cos\left(\pi / z_1\right)}{1+\cos\left(\pi / z_1\right)},$$

где z_1 – число зубьев ведущей звездочки.

Пусть $z_1 = 25$, тогда $\mu = 0{,}8\%$. С увеличением числа зубьев уменьшается μ, но возрастают габариты передачи.

В результате неточностей изготовления и износа возникает разноразмерность звеньев цепи. В этом случае коэффициент неравномерности равен

$$\mu = 2\ \left[\frac{1-\cos\left(\pi / z_1\right)}{1+\cos\left(\pi / z_1\right)} + \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}\left(1+\cos\left(\pi / z_1\right)\right)}\right],$$

где $R_{\max}$, $R_{\min}$ – максимальный и минимальный радиусы размещения шарниров цепи на зубьях звездочек.

Пусть износ составляет 1%, то есть $(R_{\max} - R_{\min})/ R_{\min} = 0{,}01$.

Тогда, если $z_1 = 25$, то $\mu = 1{,}8\%$.

Как видно из приведенных расчетов износ звеньев цепи более существенная причина появления колебаний поперечного размера стержня [4]. Это же подтверждает опыт эксплуатации серийных установок с цепной передачей.

Во всех механизмах подобного типа возникает неравномерность скорости вытягивания. Например, во фрикционной передаче неравномерность порождается эксцентриситетом тел вращения, в ременной – упругим скольжением в процессе эксплуатации, в цепной – гранностью и эксцентриситетом звездочек, разноразмерностью звеньев цепи. Эти механизмы содержат большое число подвижных деталей, они инерционны и, следовательно, малопригодны для использования в системах управления процессом вытяжки. Предложены схемы, расширяющие рамки рассмотренной классификации механизмов вытяжки.

Виды контроля

При прямом контроле измеряется геометрия поперечного сечения вытягиваемого изделия (диаметр стержня, его овальность и т.п.). Как правило, регулирование осуществляется путем изменения скорости вытягивания.

При косвенном контроле измеряется параметр, величина которого зависит от геометрии стержня. Такими параметрами могут являться – величина натяжения стержня (усилие вытяжки) или геометрическая форма зоны формирования стержней.

Заключение

Проведенные исследования позволили сформулировать направления совершенствования установок вытяжки для автоматизированного производства световодов, в соответствии с которыми предложен ряд схемных технических решений.

При этом принято во внимание следующее.

Установки должны обеспечивать наименьший уровень помех, обусловленных нестабильностью скорости вытягивания и вибрациями подвижных частей [5].

Установки должны создавать стабильные контролируемые условия в зоне формирования [6].

Управление по отклонению выходного параметра неэффективно из-за больших запаздываний и инерционности процесса. Управление по возмущению потребовало разработки установок вытяжки с системами контроля усилия вытягивания [7].

Системы управления должны работать в режиме реального времени, обеспечивая мгновенную реакцию на отклонение контролируемого параметра. Установки с такими системами нуждаются в малоинерционных регулирующих органах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мышкис А. Д.* Элементы теории математических моделей. – М.: Комкнига, 2007. – 192 с.

2. *Лойцянский П. Г.* Механика жидкости и газа. Изд. 6-е. – М.: Наука, 1997. – 740 с.

3. *Воробьев Н. В.* Цепные передачи. – М.: Машиностроение, 1995. – 250 с.

4. *Гончаревич И. Ф.*, *Фролов К. В.* Теория вибрационной техники и технологий. – М.: Наука, 1997. – 320 с.

5. *Исаков С. К.*, *Бахарев И. К.*, *Уваров В. П.* А.с. 992435 СССР, МКИ СОЗ В 15/14. Устройство для вытягивания изделий из стекла. БИ – 1983, Бюл. № 4.

6. *Уваров В. П.*, *Бахарев И. К.* А.с. 1669879 СССР, МКИ СОЗ В 37/16. Устройство для вытягивания стеклоизделий. БИ – 1991, Бюл. № 30.

7. *Бахарев И. К.*, *Воронова Л. Г.*, *Уваров В. П.* А.с. 1791403 СССР, МКИ СОЗ В 37/00. Устройство для получения стекловолокна. БИ – 1993, Бюл. № 4. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Алексеева Любовь Борисовна – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет, e-mail: lbalek@rambler.ru.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 16–22.

UDC
621.531.3

L.B. Alekseeva

REQUIREMENTS FOR DESIGNING MECHANISMS OF GLASS ROD DRAWING

The scope of the discussion embraces standard manufacture of light waveguides (glass rods). The manufacture process uses the method of drawing from a drawing die or the method of drawing from a semi-finished product with the temperature-softened end. The both methods need the drawing equipment. The various resultant products enjoy wide range application, from medicine to industry, e.g. endoscopes for testing motors and other complex engineering systems. The requirements imposed on quality of such products are extremely high. The quality depends on many physical and technical factors the optimality of which is ensured by the drawing process control. The analysis of the drawing processes uses the mathematical model composed of three groups of equations: equations of continuity, equations of equilibrium and equations of state of fluid glass. Based on the accepted model, the static properties of the control object, which govern sensitivity of shaping zone relative to disturbances of process parameters, are estimated. This estimation, depending on the requirements for the accuracy of the geometry of a drawn light waveguide, allows determining a precise level to maintain the process parameters: rate of drawing, temperature of heating fluid glass (viscosity), force of drawing. The basic types of drawing mechanisms are reviewed. One of the main criteria of selecting a drawing mechanism is the ability of the mechanism to sustain highly uniform rate of drawing. The schemes to expand the limits of the considered classification of drawing mechanisms are proposed. The performed research has allowed formulating the areas of improvement of drawing plants for automated manufacture of light waveguides.

Key words: mathematical model, control, rate, drawing, light waveguide, shaping zone, plant, object, method, process parameters.

AUTHOR

Alekseeva L.B., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: lbalek@rambler.ru.

REFERENCES

1. Myshkis A. D. *Elementy teorii matematicheskikh modeley* (Elements of theory of mathematical models), Moscow, Komkniga, 2007, 192 p.

2. Loytsyanskiy P. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*. Izd. 6-e (Mechanics of liquid and gas. 6th edition), Moscow, Nauka, 1997, 740 p.

3. Vorob'ev N. V. *Tsepnye peredachi* (Chain transmissions), Moscow, Mashinostroenie, 1995, 250 p.

4. Goncharevich I. F., Frolov K. V. *Teoriya vibratsionnoy tekhniki i tekhnologiy* (Theory of vibrating machines and technologies), Moscow, Nauka, 1997, 320 p.

5. Isakov S. K., Bakharev I. K., Uvarov V. P. *Copyright certificate no 992435 USSR, MKI SOZ V 15/14*, 1983.

6. Uvarov V. P., Bakharev I. K. *Copyright certificate no 1669879 USSR, MKI SOZ V 37/16*, 1991.

7. Bakharev I. K., Voronova L. G., Uvarov V. P. *Copyright certificate no 1791403 USSR, MKI SOZ V 37/00*, 1993.