



**АВЛ** Автоматизація  
виробничих  
процесів



*Всеукраїнський  
науково-технічний  
журнал*

**2** (15)

**КИЇВ 2002**

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Ю. Б. Беляев, докт. техн. наук, И. К. Сенченков, докт. физ.-мат. наук, В. А. Зозуля, канд. техн. наук

Эффективность управления технологическими процессами во многом зависит от степени внедрения в управляющую систему закономерностей технологического процесса. В основу внедрения закономерностей закладываются результаты научных исследований, основанные на математическом анализе технологических процессов, регламентирующие закон управления, основывающийся на современной теории управления.

Одним из таких технологических процессов является экологически чистый способ восстановления гильз цилиндров методом термопластического деформирования (ТПД) [1], как наиболее ответственной и в то же

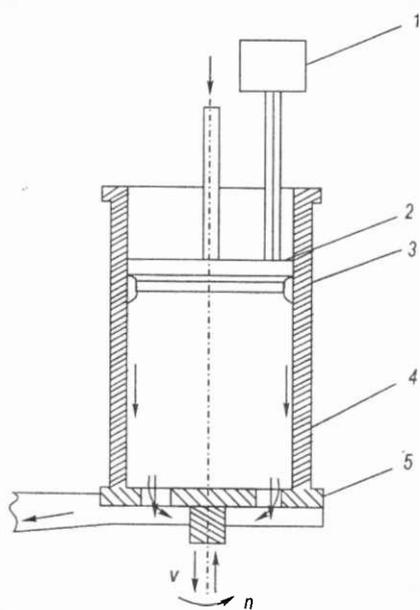


Рис. 1. Схема установки для размерной ТПД гильзы цилиндра:  
1 — ТВЧ; 2 — индуктор; 3 — спрейер;  
4 — гильза; 5 — устройство для вращения и возвратно-поступательного движения гильзы

время сложной для восстановления детали двигателя внутреннего сгорания. Суть метода заключается в том, что с помощью ТВЧ (рис. 1) происходит быстрый местный нагрев с последующим быстрым охлаждением водяным душем. Перемещение гильзы относительно источника нагрева и охлаждения позволяет создать в ней температурное поле, характеризующееся осевым по высоте гильзы температурным градиентом большой крутизны, в результате которого возникают резко изменяющиеся тепловые напряжения. При этом нагретый металл деформируется и после охлаждения возникают остаточные перемещения, которые обеспечивают восстановление внутренней поверхности гильзы. Качественно улучшить процесс восстановления можно путем автоматического управления степенью нагрева по высоте гильзы  $z$ .

В процессе восстановления гильз цилиндров методом ТПД возникают сложные задачи, связанные с необходимостью формирования полей остаточных перемещений, соответствующих реальным кривым износа цилиндров, которые требуют предварительного анализа его как объекта управления.

На основе анализа входных и выходных переменных, изменяющегося характера динамических явлений, общая схема управления процессом ТПД при восстановлении гильз цилиндров представлена на рис. 2.

Состояние объекта управления характеризуется температурой  $\theta_i$ , напряжением  $\sigma_m$ , деформацией  $\epsilon_r$  и перемещениями  $u_r(z)$ . Вектор  $X =$

$$X = \begin{pmatrix} \theta_i \\ \sigma_m \\ \epsilon_r \\ u_r(z) \end{pmatrix}$$



Рис. 2. Общая

Управляющее воздействие  
Датчик  
Управляемый объект  
Вектор выходных переменных, скорости  
на каждом сечении

зывается вектор  
 $\psi(z)$  являются вы  
входными для об

действиями, а  $U$

уравнение объек

$$X_k = \begin{pmatrix} \theta_i \\ \sigma_m \\ \epsilon_r \\ u_r(z) \end{pmatrix}$$

где  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Переменные  
для подсистем.  $U$   
ляющие воздейст  
На основании эт

$$= E_k(\Delta u_k)$$

Анализ взаим  
управление степ  
ности источника  
стенки гильзы в  
регулируемого  
нагрева и охлажд  
дения  $M(t)$  в точ  
значения скорости

Более конкрет  
носа  $\Delta_{изн}(z)$  по  
гического воздей  
распределение о  
ло вид

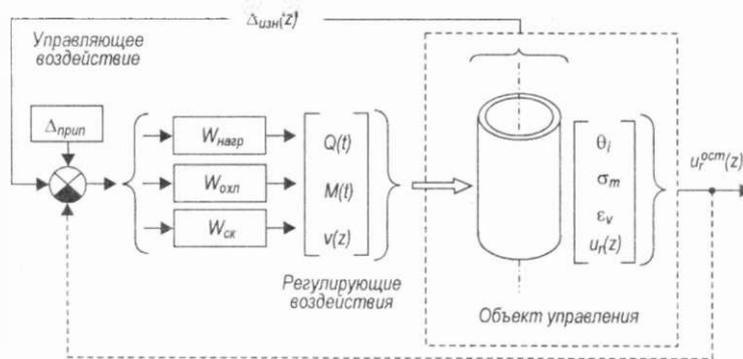


Рис. 2. Общая схема управления процессом термопластического деформирования гильз цилиндров:

$W_{нагр}$ ,  $W_{охл}$ ,  $W_{ск}$  — передаточные функции подсистемы нагрева, охлаждения, скорости перемещения;  $\Delta_{изн}(z)$  — величина износа гильзы по высоте в каждом сечении;  $\Delta_{прип}$  — величина припуска на механическую обработку;  $u_r^{ост}(z)$  — остаточное перемещение

зывается вектором состояния объекта управления. Значения  $Q(t)$ ,  $M(t)$  и  $v(z)$  являются выходными переменными для подсистем и одновременно входными для объекта управления. Они называются регулирующими воздействиями, а  $Y = \begin{bmatrix} Q \\ M \\ v(z) \end{bmatrix}$  — вектором регулирования. Таким образом, общее

уравнение объекта управления можно записать в виде

$$X_k(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_v, u_{r1}, u_{r2}, \dots, u_{rj},) = Y_k(Q, M, v_1(z), v_2(z), \dots, v_b(z)),$$

где  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Переменные, характеризующие состояние объекта, не входят в уравнение для подсистем. Внешними возмущениями для подсистем являются управляющие воздействия  $\Delta_{прип} + \Delta_{изн1}(z)$ ,  $\Delta_{прип} + \Delta_{изн2}(z)$ , ...,  $\Delta_{прип} + \Delta_{изnf}(z)$ . На основании этого подсистемы описываются совокупностью уравнений:

$$Y_k(Q, M, v_1(t), v_2(t), \dots, v_b(t)) = E_k(\Delta_{прип} + \Delta_{изн1}(z), \Delta_{прип} + \Delta_{изн2}(z), \dots, \Delta_{прип} + \Delta_{изnf}(z)).$$

Анализ взаимосвязей позволяет выявить, что наиболее эффективное управление степенью нагрева осуществляется так: при постоянной мощности источника нагрева создают градиент температур в каждом сечении стенки гильзы в соответствии с величиной износа в данном сечении путем регулирования скорости перемещения гильзы относительно источников нагрева и охлаждения. При этом значения мощности нагрева  $Q(t)$  и охлаждения  $M(t)$  в течение всего технологического процесса будут постоянны, а значения скорости перемещения гильзы  $v(z)$  — переменными.

Более конкретно задача ставится так. Пусть задано распределение износа  $\Delta_{изн}(z)$  по высоте детали. Необходимо определить функции технологического воздействия  $v(z)$  при  $M = \text{const}$ ,  $Q = \text{const}$  таким образом, чтобы распределение остаточных перемещений  $u_r^{ост}(z)$  на поверхности  $r = r_0$  имело вид

$$u_r^{ост}(z) = -\Delta_{изн}(z) - \Delta_{прип}. \quad (1)$$

Т.е. значение скорости источника тепла  $v(z)$  в сечении  $z$ , обеспечивающее остаточное перемещение (1), является функцией значения  $\Delta_{\text{изн}}(z)$  в этом же сечении и функционалом всего распределения  $\Delta_{\text{изн}}(z')$  при  $0 < z < 2H$

$$v(z) = \bigcup_{z'=0}^{2H} (\Delta_{\text{изн}}(z), \Delta_{\text{изн}}(z')). \quad (2)$$

В соответствии с теоремой Стоуна-Вейерштрасса этот нелинейный функционал может быть аппроксимирован следующим полиномиальным разложением:

$$v(z) = v_0(z) + \upsilon \Delta_{\text{изн}}(z) + \delta \Delta_{\text{изн}}^2(z) + \dots + \int_0^H K_1(z, z') \Delta_{\text{изн}}(z') dz' + \int_0^H \int_0^H K_2(z, z', z'') \Delta_{\text{изн}}(z') \Delta_{\text{изн}}(z'') dz' dz'' + \dots, \quad (3)$$

где  $v_0(z)$ ,  $\upsilon$ ,  $\delta$ ,  $K_1(z, z')$ ,  $K_2(z, z', z'')$ ... — функции и параметры, не зависящие от  $\Delta_{\text{изн}}(z)$ , но зависящие от геометрии гильзы, свойств материала и параметров технологического процесса.

Задача определения уравнения  $v(z)$  состоит в конкретизации параметров и функций. Конкретизация осуществлялась на основе результатов численного моделирования нелинейных термомеханических процессов на примере гильзы ЯМЗ-236 [2,3].

В расчетах изучались возможности простейшей двухчленной зависимости между полем износа  $\Delta_{\text{изн}}(z)$  и скоростью  $v$ , вытекающей из общего представления (3)

$$v(z) = v_0 - \upsilon \Delta_{\text{изн}}(z), \quad (4)$$

где  $v_0$  — постоянная базовая скорость перемещения гильзы;  $\upsilon$  — постоянный коэффициент.

Величина  $v_0$  определяется, в основном, значением припуска  $u_r$  и конкретизируется серией расчетов с постоянными скоростями перемещений источника тепла  $Q$ . Параметр  $\upsilon$  характеризует масштаб изменения скорости с учетом ее корреляции с полем износа  $\Delta_{\text{изн}}(z)$ . Очевидно, что величина должна быть согласована с определенными скоростями, удовлетворяющими некоторым ограничениям по температуре и прочности.

С целью упрощения рассматривался случай, когда износ представляет собой параболическую выемку в центральной части цилиндра  $H/2 < z < 3H/2$ , которая описывается уравнением

$$\Delta_{\text{изн}}(z) = \begin{cases} 0 & 0 < z < H/2; \\ -a(z - H)^2 + c, & H/2 < z < 3H/2; \\ 0 & 3H/2 < z < 2H. \end{cases}$$

Значения коэффициентов  $a$  и  $c$  выбираются из условия, что максимальная глубина выемки равна  $\max \Delta_{\text{изн}} = 0.5 \cdot 10^{-3}$  м. Тогда  $a = 0.97 \cdot 10^{-3} 1/\text{м}$ ,  $c = 0.5 \cdot 10^{-3}$  м. Предполагается также, что минимальная скорость  $v$  достигается в момент прохождения источником центра выемки  $z = H$  и равна 2 мм/с. Этому предположению для параметра  $\upsilon$  в уравнении (4) отвечает значение  $\upsilon = 1.98 \text{ с}^{-1}$ .

Основные результаты приведены на рис. 3. Здесь кривые 1 и 2 отвечают соответственно остаточным перемещениям внутренней поверхности цилиндра для постоянных скоростей  $v = 2$  мм/с и  $v = 3$  мм/с, для уравнения скорости (4) отвечает кривая 3 с учетом компенсации краевого эффекта в

верхней ч...  
щений оп...  
скорости...  
вой  $I$  для...  
на этапе...  
вого эфф...  
Таким...  
сов с пос...  
информац...  
и использ...  
ложений...  
щений с у...

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Техно...  
лей ЯМЗ-...  
ал НИИА...
2. Сенч...  
стического...  
щий спосо...  
режение. —
3. Сенч...  
нологическ...  
/ Збірник...  
кого маши...  
галузеви ма...  
Вип. 3. —

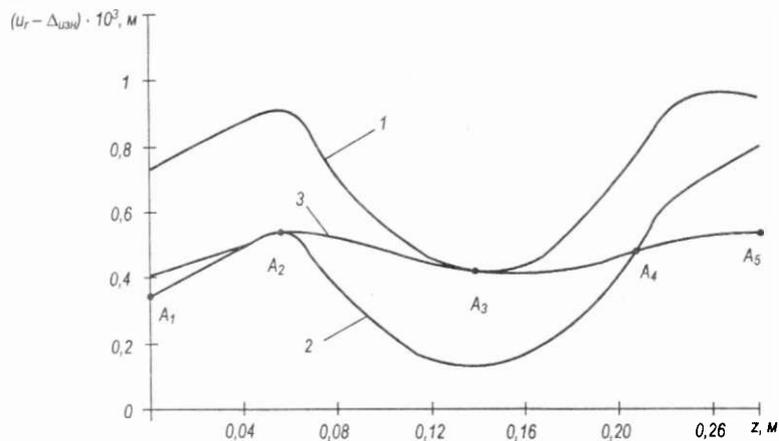


Рис. 3. Распределение остаточных перемещений по высоте гильзы:  
 1 — при  $v(z) = 2$  мм/с; 2 — при  $v(z) = 3$  мм/с; 3 — при  $v(z) = v_0 - 1,98 \Delta_{изн}(z)$

верхней части гильзы. На этапе  $A_1 A_2$  распределения остаточных перемещений определяются кривой 2. Этап  $A_2 A_3 A_4$  отвечает участку переменной скорости в области выемки. При этом окрестность точки  $A_3$  близка к кривой 1 для минимальной скорости. Распределения остаточных напряжений на этапе  $A_4 A_5$  сформированы под влиянием компенсации верхнего краевого эффекта.

Таким образом, распределения остаточных перемещений для процессов с постоянной скоростью движения источника представляют базовую информацию для процессов с переменной скоростью. Основываясь на ней и используя соотношение (4), можно с достаточной для практических приложений точностью осуществлять управление полем остаточных перемещений с учетом реальных распределений износа цилиндрических деталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Технологический процесс* по восстановлению поршней и гильз двигателей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238: Отчет Б.467086. — Челябинск: Уральский филиал НИИАТ 1975.
2. Сенченков И. К., Хромов В. Н., Семенов А. И. и др. Метод термомеханического деформирования — экологически чистый и ресурсосберегающий способ восстановления деталей машин // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 1997. — №5. — С. 25—32.
3. Сенченков И. К., Вихрова Л. Г., Зозуля В. А. Исследования влияния технологических параметров на изменение внутреннего диаметра гильзы / Збірник наукових праць Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. — Кіровоград: КІСМ. — 1998. — Вип. 3. — С. 121—126.