

1978

МИНИСТЕРСТВО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ,  
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
КИЕВСКИЙ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ИМЕНИ XXV СЪЕЗДА КПСС

**Автоматизированные системы управления  
технологическими процессами в прокатном  
производстве**

КИЕВ — 1978

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ  
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ УСИЛИЙ ПРОКАТКИ МЕТАЛЛА

О.Б.Беляев, Ю.С.Лихницкий, П.П.Тартаковский

Усилия прокатки металла на блюминге 1500 НТМК контролируются тензорезисторными датчиками деформации ДДТБ-1 станины клетки. ДДТБ-1 периодически градуируются непосредственно на месте их эксплуатации с помощью разработанной в Киевском институте автоматами гидравлической силовоспроизводящей и измерительной установки УСТГ-1-2000 /рис.1/. Силовая часть установки - нагружающий гидродомкрат 1 /НГД/ с гидравлическим мембранным силоизмерителем 2 /ИМС/ - размещается между валами, создавая их распор дозированными усилиями до 2000 т с приведенной погрешностью  $\pm 1\%$ .

Конструкция силовой части установки [1] доработана по результатам исследований в диапазоне усилий до 2200 т с целью обеспечения более надежной герметизации рабочих полостей под давлением жидкости до 1500 кгс/см<sup>2</sup> и стабилизации условий заземления мембраны в ИМС [2].

Расчет мембраны ИМС на большие усилия. Гофр в плоской мембране образуется в результате "гидравлической штамповки" непосредственно в корпусе ИМС, если последний установить на пресс и подвергнуть 25-50 %-ной перегрузке с последующей "тренировкой" номинальным усилием; при этом в полости ИМС повышается давление жидкости, вследствие чего происходит формообразование гофра [3].

Рассмотрим напряжения, возникающие при "гидравлической штамповке" в каждом элементе гофра /рис.2/, условно вырезанном коническим сечением с углом при вершине  $\alpha$  и концентрическими окружностями радиусов  $R_x$  и  $R_x + dR_x$ . Условие равновесия такого элемента

$$G_1 f_x - (G_1 - dG_1) (f_x + df_x) - 2G_2 \sin \frac{\alpha}{2} h dR_x = 0, \quad /1/$$

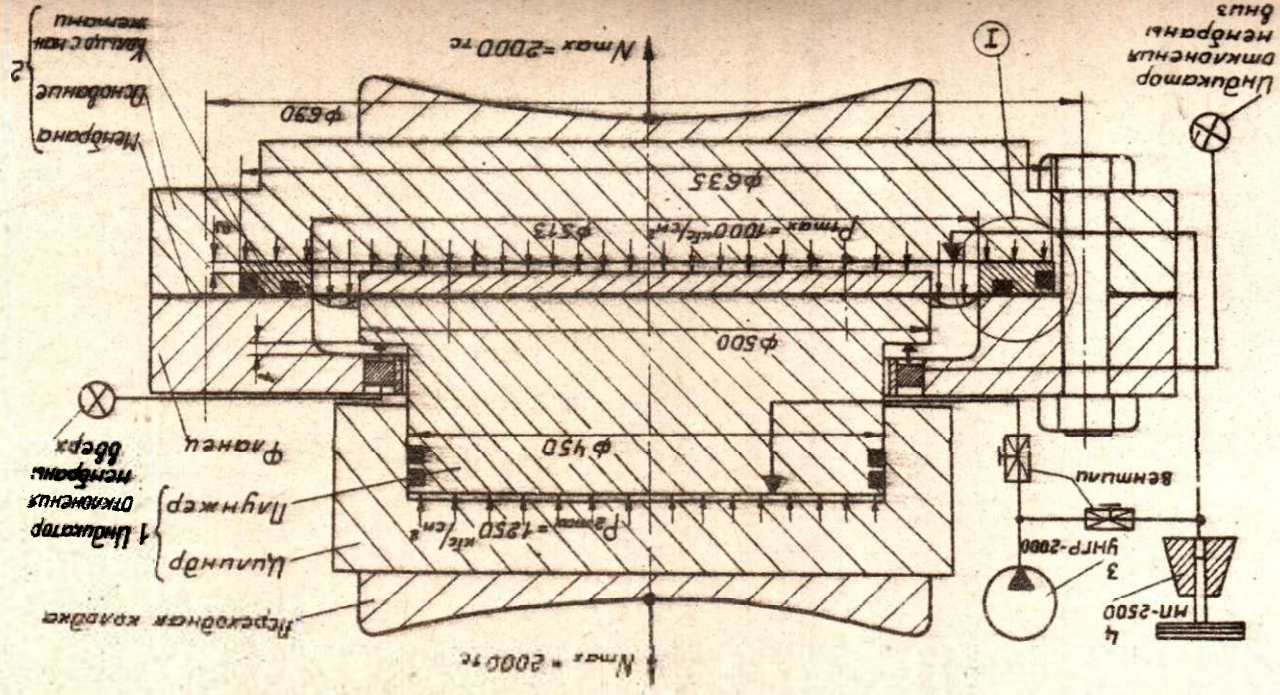
где  $G_1$  - радиальное напряжение;  $f_x$  - площадь грани элемента;  $G_2$  - окружное напряжение;  $h$  - толщина мембраны.

Пренебрегая величинами второго и выше порядков малости и принимая  $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$  вследствие малости  $\alpha$ , получаем

$$R_x dG_1 - G_1 dR_x = G_2 dR_x. \quad /2/$$

Из условия пластичности для плоского напряженного состояния  $G_1 + G_2 = \beta G_T$  имеем

Рис. 11. Гидравлический усилитель с регулируемым давлением





$$G_1 = \beta \int_{R_{cp}}^{R_1} G_T \frac{dR_T}{R_T} = \beta G_T \ln \frac{R_1}{R_{cp}}$$

$$G_2 = \beta G_T \left(1 - \ln \frac{R_{cp}}{R_1}\right)$$

где  $G_T$  - предел текучести;  $\beta$  - коэффициент пластичности;  $R_{cp}$  - радиус экстремальной точки гофра мембраны относительно оси ГМС;

$R_1$  - радиус контура внешнего защемления мембраны.

Среднее значение сопротивления пластической деформации

$$G_n = \frac{G_1 + G_2}{2}$$

Пластическая деформация при образовании гофра  $G = G_n + G_{изг}$ , где  $G_{изг} = \frac{R_0 \sigma}{2r_1 + h}$  - изгибное напряжение;  $r_1$  - радиус галтели в заземлениях;  $h$  - толщина мембраны.

Подставляя значение  $G$  в уравнение Лапласа, получаем радиус кривизны сформировавшегося гофра мембраны  $\rho = \frac{r_1 h}{p}$ , где  $p = 1,25 p_n$  - испытательное давление;  $p_n$  - нормирующее давление рабочей жидкости.

Деформация материала мембраны на участке гофра  $\epsilon = 0,5 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} - 1$ , где  $R_2$  - радиус контура внутреннего защемления мембраны.

Толщина мембраны  $h$  должна удовлетворять требованиям необходимой прочности, заданной циклической надежности, а также иметь упругую характеристику, как можно меньше влияющую на точность измерений.

Приближенный расчет одногофровой мембраны на статическую прочность можно производить по "балочной схеме" [1,4], рассматривая профиль гофра как криволинейный брус в постановке двумерной задачи

$$\frac{4ET}{\gamma_k} U = 2KN + 2\gamma_k r_1 p_n \pm \gamma_k P;$$

$$\frac{4ET}{\gamma_k} W = \frac{1}{2} (R_1^2 - R_2^2) \left( N + \frac{M}{r_1} + \gamma_k r_1 p_n \right) - (N - 2) P;$$

$$\text{где } T = \frac{b_1 h^3}{12 \gamma_k}; \quad b_1 = \frac{R_1 - 2r_1}{R_1}; \quad P = p_n \frac{2\gamma_k r_1}{360} 2L;$$

$\gamma_k$  - половина зазора между контурами внутреннего и внешнего заземления мембраны;  $U, W$  - осевое и радиальное перемещение срединной поверхности гофра мембраны;  $N, M$  - усилие и момент, действующие в меридиональном направлении гофра мембраны;  $E$  - модуль упругости материала мембраны.

Уточненный расчет циклической несущей способности мембраны может быть произведен на основании теории малых упруго-пластических деформаций [4,5], при этом одногофровую мембрану можно представить в виде осесимметричной торообразной оболочки вращения. Напряженно-деформированное состояние в гофре мембраны характеризуется сравнительно высоким уровнем упруго-пластических деформаций от действия высокого давления рабочей жидкости и осевых перемещений ЭМ, обусловленных сжимаемостью жидкости, деформациями магистралей и корпусных деталей ГМС. Одногофровая мембрана данного типа описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(NP)}{ds} &= \mu N \cos \varphi + QP - V \Phi_{\text{пл}} E \frac{h^2 \cos^2 \varphi}{p}; \\ \frac{d(NP)}{ds} &= \mu N \cos \varphi + QP \frac{1}{R_1} - \Phi_p E h \left( w \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{p} - U \frac{\cos^2 \varphi}{p} \right); \\ \frac{d(QP)}{ds} &= -N \left( \frac{p}{R_1} - \mu \sin \varphi \right) + \Phi_p E h \left( w \frac{\sin^2 \varphi}{p} - U \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{p} \right); \\ \frac{d\varphi}{ds} &= -N \frac{1}{\Phi_{\text{пл}}} \frac{h(1-\mu^2)}{h^3} - V \mu \frac{\cos \varphi}{p}; \\ \frac{dU}{ds} &= N \frac{1}{\Phi_p} \frac{1-\mu^2}{h} + w \left( \frac{1}{R_1} + \mu \frac{\sin \varphi}{p} \right) - U \mu \frac{\cos \varphi}{p}; \\ \frac{dw}{ds} &= V - U \frac{1}{R_1}. \end{aligned} \right\} 15/$$

Эта система уравнений содержит функции, представляющие собой силовые факторы и перемещения элементов мембраны:

$Q$  - усилие, действующее в направлении нормали;  $\varphi$  - угол между нормалью к срединной поверхности гофра и осью мембраны;  $s$  - шаг интегрирования вдоль гофра;  $V$  - изменение угла  $\varphi$  от деформации гофра;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $\Phi_{\text{пл}}, \Phi_p$  - функции пластичности

$$\Phi_{\text{пл}} = \frac{h_2}{h^2} \int_{z_0}^{N_2} \frac{G_i}{E_i} (z - \Delta z_0)^2 dz, \quad 16/$$

где  $G_i$  и  $E_i$  - интенсивность напряжений и деформаций в полуцикле, отсчитываемые от момента начала разгрузки

$$\left. \begin{aligned} E_i &= \frac{G_i}{E} \quad \text{при } G_i \leq \sigma_T; \\ E_i &= \frac{G_i}{E} + F(R) \left[ f\left(\frac{G_i}{\sigma_T}\right) - \frac{G_i}{\sigma_T} \right] \quad \text{при } G_i > \sigma_T; \end{aligned} \right\} 17/$$

где  $F(k)$  - функция числа полуциклов нагружения  $k$ ;  $f(\frac{G_i}{S}) = f(\sigma_i)$  - функция, определяемая по кривой однократного деформирования;  
 $\sigma_T$  и  $\epsilon_T$  - напряжение и деформация, соответствующие пределу пропорциональности при циклическом деформировании

$$\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_y^2 + \epsilon_\theta^2 + \epsilon_y \epsilon_\theta}, \quad /8/$$

где  $\epsilon_y = \frac{du}{ds} - \frac{w}{R_i} \pm z \frac{dV}{ds}$  - для осевой деформации;  
 $\epsilon_\theta = u \frac{\cos \varphi}{R} - w \frac{\sin \varphi}{R} \pm z V \frac{\cos \varphi}{R}$  - для окружной деформации;

$$\Phi_p = \frac{1}{h_{\text{чк}}} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} dz, \quad /9/$$

где  $z$  - расстояние от средней поверхности до наружного слоя гофра;  
 $\Delta z_0 = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{G_i}{\epsilon_i} z dz / \int_{-h/2}^{h/2} \frac{G_i}{\epsilon_i} dz$  - смещение нейтральной поверхности гофра от средней.

Граничные условия для системы /5/ задаются в начале и конце интервала интегрирования в виде трех комбинаций из известных значений размахов шести компонентов. В данном случае для одногофровой мембраны граничные условия можно задать в виде:  $V = W = u = 0$  - на внешнем контуре заземления,  $v = w = 0$  и  $u = \pm 0,7$  мм - на внутреннем. Размахи величин  $M, N, Q$  определяются из системы /4/.

Как известно [4,5], статическая прочность зависит от давления рабочей жидкости, а разрушение от усталости определяется переменными смещениями ЖМ в процессе измерений усилий.

Для более оперативной оценки циклической долговечности мембраны можно использовать известное уравнение малоциклового усталости материала [6]:

$$N_y = \sqrt{\frac{E \sigma_{100} (1 - \psi)}{4(\sigma_a - \frac{\sigma_a \psi}{2})}}, \quad /10/$$

где  $\sigma_a$  - амплитуда деформаций;  $\psi$  - относительное сужение поперечного сечения образца материала мембраны при растяжении;  $\sigma_{100}$  - предел усталости материала;  $N_y$  - число циклов до разрушения.

При заданной  $\sigma_a$ , имея механические характеристики материала мембраны  $\psi, \sigma_{100}, E$ , можно определить число циклов перемещений ЖМ в процессе измерений усилий.

Для УСТГ-I-2000, исходя из малой периодичности ее использования, принято  $N_y \leq 10^4$  при перемещении ЖМ  $S \approx 1,5$  мм. Размеры

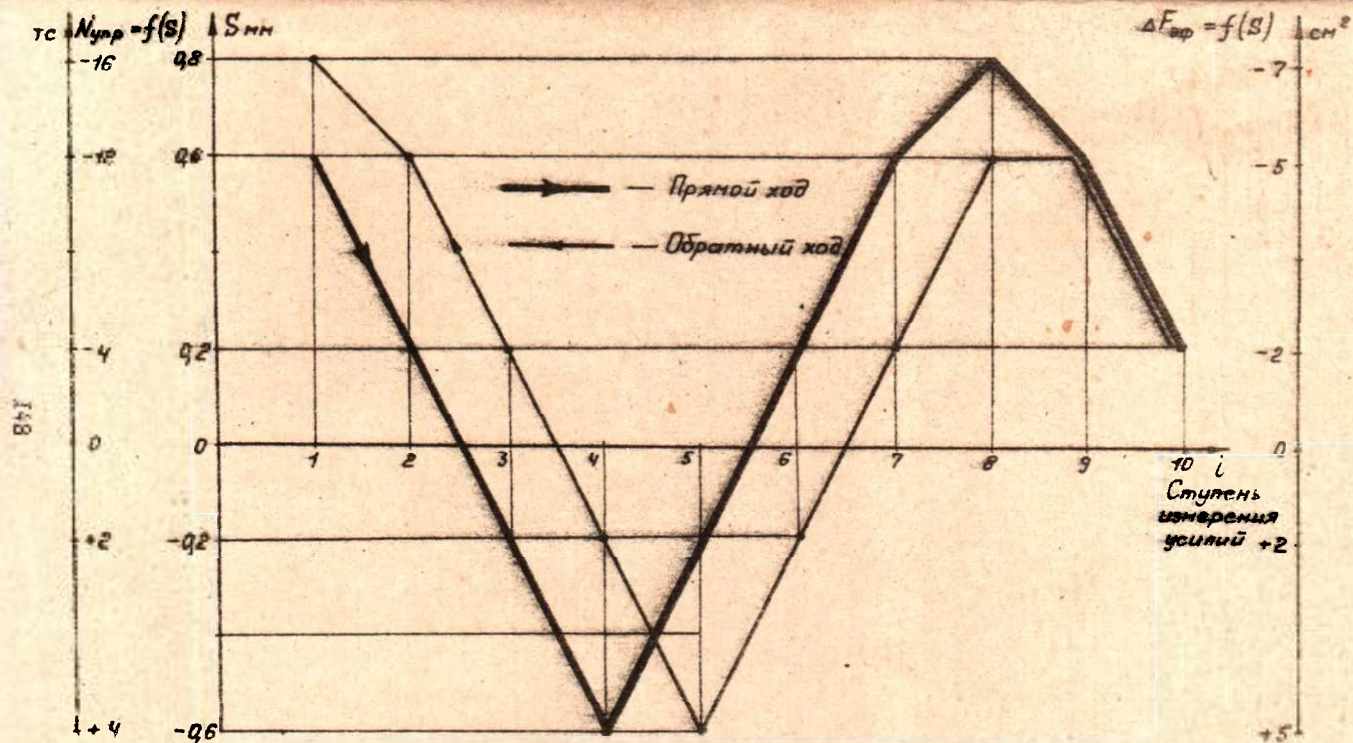


Рис.3. Рабочее перемещение мембраны при измерениях усилий до 2000 тс, влияние сил упругости и изменения эффективной площади мембраны как поправки к расчетной формуле



гофра мембраны указаны на рис.2. Материал мембраны - сталь Х15Н90 /ЭИ-835/.

Результаты экспериментальных исследований УСТГ-I-2000. Комплекс испытаний и метрологических исследований УСТГ-I-2000 проводился совместно с Харьковским институтом метрологии /ХИИИМ на специальной станции Московского ВНИИМЕТМАШа с пределом усилий 2200 тс.

Давления жидкости в полости ГМС дозировались грузопоршнем манометром типа МП-2500 класса 0,05, а усилия, развиваемые ПД, измерялись группой из четырех параллельно установленных образцовых динамометров типа ДОСМ-500 третьего разряда.

Результаты измерений усилий по динамометрам сравнивались с ожидаемыми значениями усилий, вычисленными по формуле /II/ исходя из условия равновесия ШМ

$$N_i = p_i (F \mp \Delta F_i) \mp Q_s - G, \quad /II/$$

где  $F = \frac{\pi}{4} (D^2 + Dd + d^2) \approx 2014 \text{ см}^2$  - эффективная площадь мембраны в ее среднем положении;  $\Delta F_i = \frac{\pi}{4} (D + 2d) \frac{\Delta S_i}{2g}$  - изменение эффективной площади мембраны при перемещении  $S_i$ ; ШМ /рис.3/;  $Q_s = f(S_i)$  - упругая характеристика мембраны,  $G = \text{const} = 15$ , вес ШМ вместе с деталями и приборами.

При этом пренебрегаем влиянием на равновесие ШМ факторов, величина которых не превышает значения 100 кгс. В данном случае усилия, рассчитанных по формуле /II/ удовлетворительно совпадают с результатами экспериментальных измерений, позволяющих определить данный ГМС как прибор первого класса точности.

#### Выводы и рекомендации

I. Экспериментальное проектирование, макетирование, лабораторные метрологические исследования, промышленные испытания и внедрение в составе АСУ ТП на блеминге 1500 НТМК гидравлической силоизмерительной тарировочной установки УСТГ-I-2000 позволяют сделать вывод о необходимости, целесообразности и возможности производить в производственных условиях градуировку рабочих средств измерения усилий прокатки металла. Установки типа УСТГ могут выполнять функции образцовых средств для метрологического обеспечения измерителей больших усилий на местах их эксплуата-

ции - в рабочих клетях прокатных станов.

2. Проведенный комплекс исследований гидравлического мембранного силоизмерителя на 2000 тс класса I позволяет сделать вывод о возможности повышения класса точности этого прибора при условии его модернизации, а именно: контроль величины перемещения жесткого центра мембраны, введение компенсационного уплотнительного узла контура внешнего защемления мембраны, увеличение жесткости силовых болтов, формирование гофра мембраны 25-50%-ной перегрузкой давлением с последующей "тренировкой".

3. Эти силоизмерители могут служить основой для разработки аналогичных установок для листовых станов. Тарировочные установки могут изготавливаться на заводах среднего и тяжелого машиностроения. Они удобны в эксплуатации, их применение занимает небольшое время простоя оборудования в технологическом процессе прокатки металла.

#### Л и т е р а т у р а

1. Тартаковский П.П., Белнев Ю.Б., Шевченко Н.Д. - В сб.: "Автоматизация прокатных станов". М., "Металлургия", 1976, с.258-262 с ил.
2. *Zeitlin Alexander. Mechanical Engineering.* # 12, 1965
3. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М., "Машиз", 1961.
4. Гокун М.В. и др. - "Машиноведение", 1971, # 2.
5. Серясев С.В. и др. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М., "Машиностроение", 1975.
6. *Langer B.F. Journal of basic engineering. Series D,* 1962, # 3.