

УДК 621.774.6

Завгородний А. В.
Настоящая С. С.**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБЕЧАЕК ПРИ ИХ ФОРМОВКЕ НА ЛИСТОГИБОЧНЫХ МАШИНАХ**

Одну из первых ролей в современной металлообрабатывающей промышленности занимает производство труб, обечаек и цистерн из стали и цветных металлов, ведь подобного рода изделия используются повсеместно в нефтегазовой отрасли, энергетике, машиностроении и других отраслях. Существует несколько способов производства: прошивка кованой заготовки, прокатка, редуцирование, волочение, вальцовка и др. Все эти методы, исключая, пожалуй, вальцовку, нашли свое применение в массовом производстве, которое характеризуется применением дорогостоящих станов и технологической оснастки. В мелкосерийном производстве использование этих методов нецелесообразно, в связи с чем для производства небольших партий труб и изделий нестандартного типоразмера (цистерны, обечайки) применяют вальцовку, как более универсальный и недорогой метод производства [1].

Целью данной работы является разработка математической модели напряженно-деформированного состояния металла обечаек при их формовке, а также автоматизированное проектирование технологических режимов процесса формовки на листогибочных машинах.

При реализации вальцовки используют двухвалковые, трехвалковые и четырехвалковые (рис. 1) листогибочные машины или вальцы.

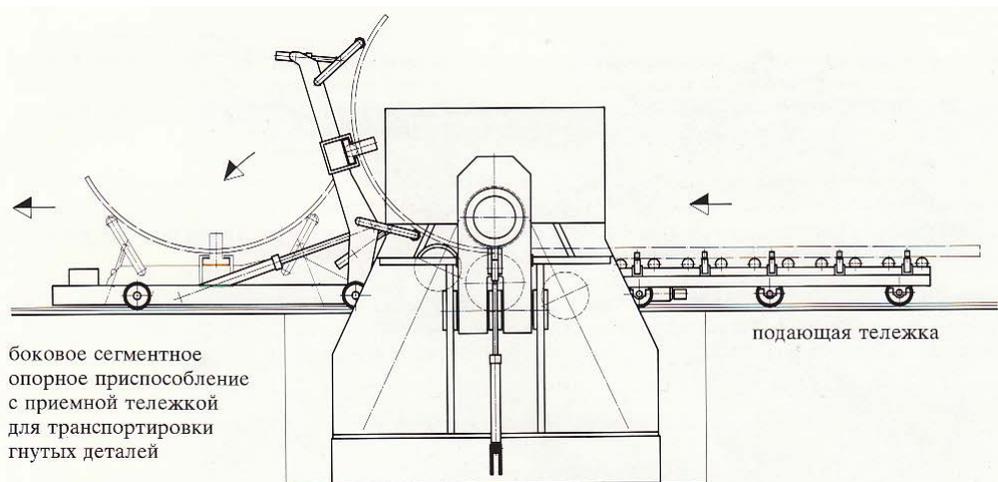


Рис. 1. Общий вид четырехвалковой листогибочной машины с гидроприводом

Рассмотрим математическую модель напряженно-деформированного состояния металла при изгибе листового металла на листогибочных машинах. Данная модель основывается на выделении элементарного поперечного сечения листа, а затем численном решении конечно-разностной формы условия статического равновесия для него. В соответствии с этим рассматриваемая расчетная схема (рис. 2, а) включает в себя исходное состояние заготовки, характеризуемое толщиной h и исходной кривизной χ_0 , нагруженное состояние с текущей кривизной χ_1 и прогибом опорной системы W , и конечное состояние, которое характеризуется требуемой кривизной $\chi_{ост}$. Влиянием деформаций сдвига и связанными с ними касательными компонентами тензора напряжений пренебрегаем, что позволяет использовать гипотезу плоских сечений и существенно упрощает аналитическое описание условия связи деформаций и напряжений.

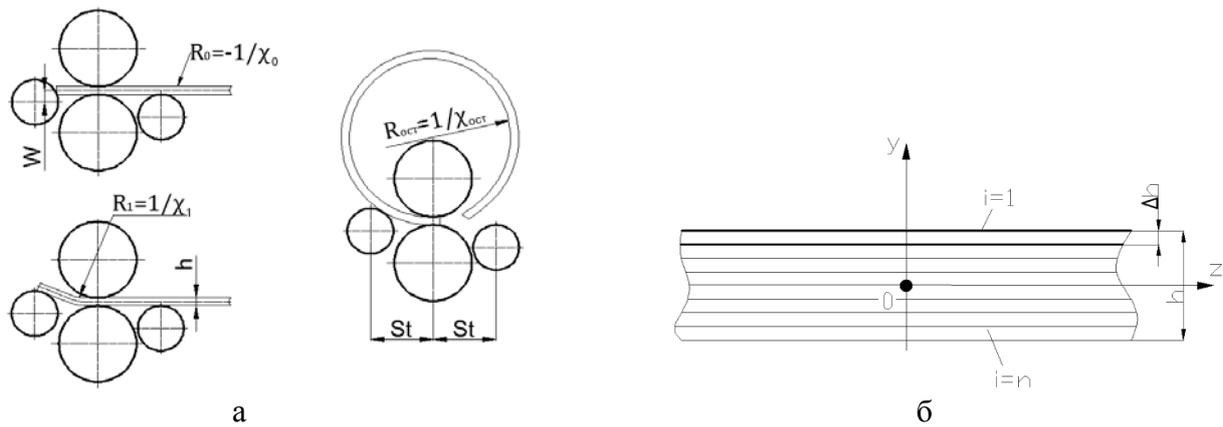


Рис. 2. Технологическая схема формовки листового металла:
 а – расчетная схема модели; б – расчетная схема поперечного сечения листа применительно к математическому моделированию процесса гибки

Непосредственно математическое моделирование заключается в разбиении поперечного сечения листа на элементарные поперечные сечения с порядковыми номерами $i=1..n$ и последующем определении их геометрических характеристик (см. рис. 2, б):

$$\Delta h = h / n; \tag{1}$$

$$y_i = h/2 + \Delta h(i - 0.5); \tag{2}$$

Приняв допущение о соответствии линии упругопластического изгиба дуге окружности, определяем радиус кривизны средней линии (см. рис. 2, а):

$$R_1 = St^2 + h \cdot W + W^2/2 \cdot W, \tag{3}$$

где St – шаг опорной системы; W – величина перекрытия.

Количественные оценки относительных деформаций напряжения-сжатия могут быть получены, исходя из чисто геометрического решения изогнутого листа, имеющего начальную кривизну χ_0 [2]

$$\varepsilon_{y_i} = \frac{(1 + \chi_1 \cdot y_i) \cdot \varepsilon_{cp} - (\chi_1 - \chi_0) \cdot y_i}{1 + \chi_0 \cdot y_i}, \tag{4}$$

где ε_{cp} – относительная деформация растяжения линии, соответствующей средней линии листового металла (см. рис. 2, а).

Вместе с тем, с точки зрения процессов холодной обработки давлением, более приемлемым является использование в качестве показателя деформированного состояния не величины относительного обжатия, а интенсивности деформации ε_i , определяемые как [3]:

$$\varepsilon_i = (\sqrt{2}/3) \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \tag{5}$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные линейные деформации.

Главные линейные деформации для плоского деформированного состояния связаны между собой следующими соотношениями: $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \ln(l_1/l_0) = \ln(1 + \varepsilon_{y_i})$ и $\varepsilon_2 = 0$.

Переходя к аналитическому описанию функциональной связи $\sigma_Y(\varepsilon_i)$, введем дополнительное понятие остаточной степени деформации, определяемое с учетом известного значения модуля упругости материала E [4]:

$$\varepsilon_{ост_i} = \varepsilon_i - \sigma_{Y_i} / E, \tag{6}$$

а также дополнительные понятия напряжений текучести материала листа:

$$\sigma_{t_i} = a_0 + a_1 \cdot \varepsilon_i + a_2 \cdot \varepsilon_i^2 + a_3 \cdot \varepsilon_i^3, \tag{7}$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – значения коэффициентов регрессии аналитического описания интенсивности деформационного упрочнения различных металлов и сплавов.

Полученные с учетом изложенного выше аналитические выражения при одновременном указании диапазонов их возможного использования, определяемых количественно соответствующим показателям интенсивности деформации ε_i , сведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимости для определения напряжений и деформаций при вальцовке

Параметр	Характер нагружения металла		
	Упругопластическое растяжение	Упругая деформация	Упругопластическое сжатие
ε_i	$\varepsilon_i^{(+)} > \varepsilon_{ocm_i} + \sigma_{R_i} / E$	$\varepsilon_i^{(+)} \leq \varepsilon_{ocm_i} + \sigma_{R_i} / E$ $\varepsilon_i^{(-)} \leq \varepsilon_{ocm_i} + \sigma_{S_i} / E$	$\varepsilon_i^{(-)} < \varepsilon_{ocm_i} + \sigma_{S_i} / E$
σ_Y	σ_{R_i}	$E(\varepsilon_i - \varepsilon_{ocm_i})$	σ_{S_i}
ε_{ocm}	$\varepsilon_i - \sigma_{Y_i} / E$	ε_{ocm_i}	$\varepsilon_i - \sigma_{Y_i} / E$

Представленные зависимости (см. табл. 1) в сочетании с организацией численного интегрирования:

$$T_{y_k} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot \Delta h; \tag{8}$$

$$M_{y_k} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot y_i \cdot \Delta h, \tag{9}$$

составили полный алгоритм по автоматизированному расчету напряженно-деформированного состояния обечаек при их формовке. Показатели относительной деформации слоя, соответствующего координате центра тяжести рассматриваемого сечения для упругопластической нагрузки ε_{cp_k} и разгрузки $\chi_{ocm(k+1)}; \varepsilon_{ocm(k+1)}$ определяли на основе дополнительной итерационной процедуры, аналитическое описание которой имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{cp_k} = \varepsilon_{cp_k} - T_{y_k} / (E_{Mc} \cdot F_S); \tag{10}$$

$$\varepsilon_{ocm(k+1)} = \varepsilon_i - \sigma_i / E; \tag{11}$$

$$\chi_{ocm(k+1)} = \chi_{ocm_k} - M_{y_k} / (E_{Mc} \cdot J_S), \tag{12}$$

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения; F_S, J_S – площадь и момент инерции поперечного сечения листового металла.

Для оценки степени сходимости итерационных процедур решения (8)–(12) использовали следующее условие:

$$\delta_k = |T_{y_k} / h| + |M_{y_k} / h^2| \leq 0,01. \tag{13}$$

С точки зрения математической постановки решение задачи по автоматизированному проектированию технологических режимов процесса формовки на листогибочных машинах сводится к определению прогибов W при упругопластическом нагружении, обеспечиваю-

щих требуемый радиус кривизны $R_{ост}$ готовой металлопродукции по мере упругопластической разгрузки. В качестве целевой функции при решении данной задачи была использована математическая модель (1)–(13), а для определения требуемого значения W использовали метод целенаправленного перебора вариантов, имеющий следующий вид:

$$W_{(k+1)} = W_k + A_W, \quad (14)$$

где A_W – шаг изменения величины прогиба опорной системы.

С учетом количественного представления шага изменения A_W решение условия (14) было сведено к виду:

$$W_{(k+1)} = W_k + 0,5(\text{мм}) \text{ при } |\Delta| > [\Delta]. \quad (15)$$

В первом цикле в качестве опорного значения было принято $W_k|_{k=1} = 0,5$.

Полученная с учетом изложенного выше блок-схема алгоритма автоматизированного проектирования технологических и конструктивных режимов правки труб на косовалковых трубоправильных машинах представлена на рис. 3.

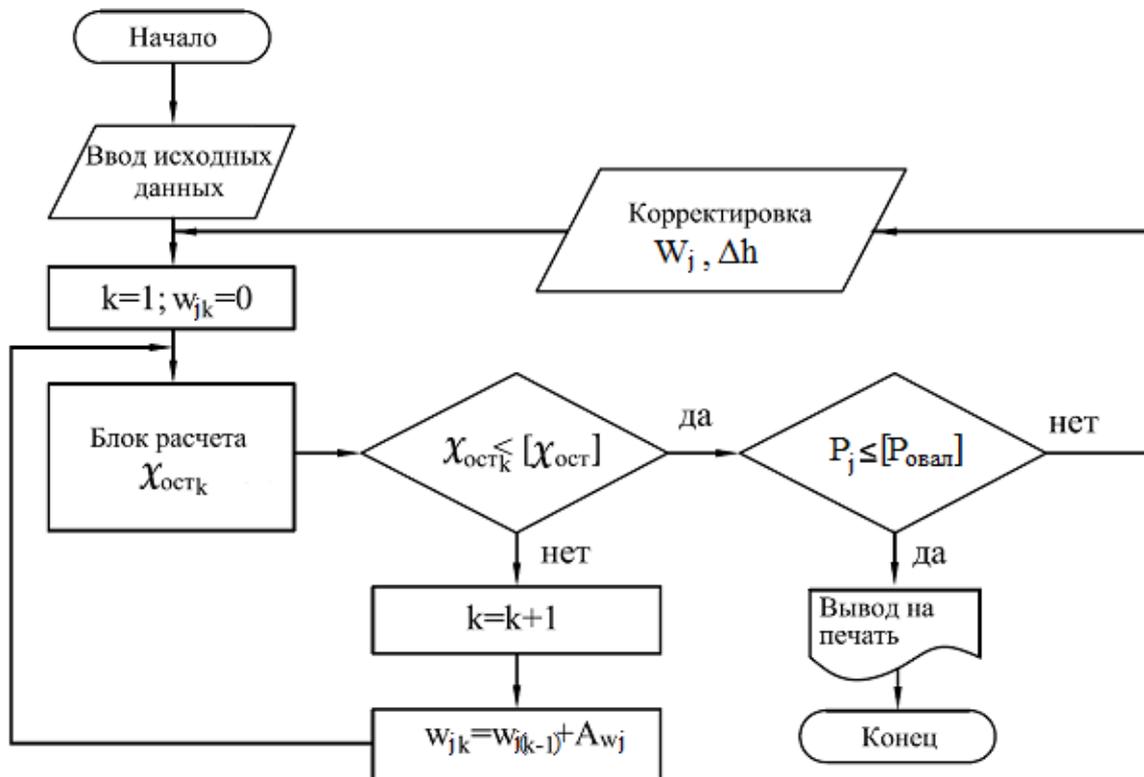


Рис. 3. Укрупненная блок-схема алгоритма автоматизированного проектирования технологических режимов работы и настройки оборудования косовалковых трубоправильных машин.

В качестве примеров результатов численной реализации полученной математической модели и соответствующих ей программных средств на рис. 4 представлены расчетные распределения зависимости остаточного радиуса кривизны $R_{ост}$ от перекрытия W , при различных значениях толщины листа и шага листогибочной машины. Данные расчеты были выполнены применительно к формовке листа толщиной 180 мм из стали 45. При величине перекрытия $W = 400$ мм, $R_{ост}$ составил 602 мм.

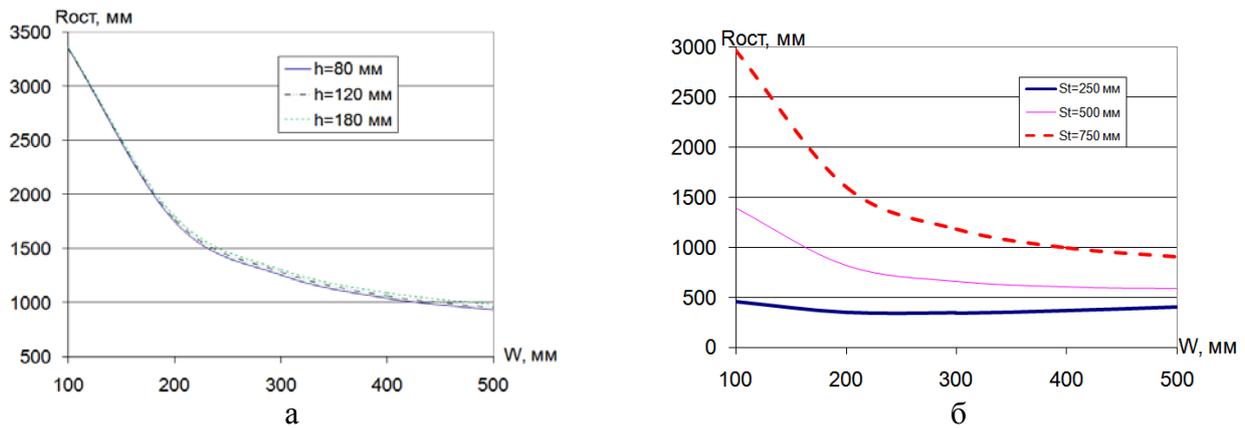


Рис. 4. Расчетные зависимости остаточного радиуса кривизны $R_{ост}$ от перекрытия W , при различных значениях толщины листа (а) и шага листогибочной машины (б)

Анализируя полученные результаты, было установлено, что при увеличении прогиба средним валком W результирующий радиус кривизны $R_{ост}$ уменьшается (см. рис. 4, б).

ВЫВОДЫ

Проанализировано влияние исходных технологических и конструктивных параметров при формовке на листогибочных машинах на результирующую кривизну готовой металлопродукции. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния металла обечаек при их формовке, а также решена задача по автоматизированному проектированию технологических режимов процесса формовки на листогибочных машинах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошин Е. Н. Гибка и правка на ротационных машинах / Е. Н. Мошин. – М. : Машиностроение, 1967. – 272 с.
2. Одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при правке растяжением с изгибом / В. И. Дунаевский, В. А. Самойлов, А. В. Сатонин, А. Б. Егоров // Изв. вузов Черная металлургия. – 1994. – № 9. – С. 44–47.
3. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
4. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман // В 2т. Т.1. Металловедение и термическая обработка стали. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с.

REFERENCES

1. Moshnin E. N. Gibka i pravka na rotacionnyh mashinah / E. N. Moshnin. – M. : Mashinostroenie, 1967. – 272 s.
2. Odnomernoe matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostojaniya pri pravke rastjazheniem s izgibom / V. I. Dunaevskij, V. A. Samojlov, A. V. Satonin, A. B. Egorov // Izv. vuzov Chernaja metallurgija. – 1994. – № 9. – S. 44–47.
3. Storozhev M. V. Teorija obrabotki metallov davleniem: uchebnik dlja vuzov / M. V. Storozhev, E. A. Popov. – 4-e izd., pererab. i dop. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 423 s.
4. Fridman Ja. B. Mehanicheskie svojstva metallov / Ja. B. Fridman // V 2t. T.1. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka stali. – M. : Mashinostroenie, 1974. – 472 s.

Завгородний А. В. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. АММ ДГМА;
Настоящая С. С. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. ИиИГ ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия,
г. Краматорск.

E-mail: n-s18@yandex.ua, amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 28.09.2015 г.