

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК НА РОТАЦИОННЫХ ЛИСТОГИБОЧНЫХ МАШИНАХ

Технологические процессы гибки листовых заготовок в ротационных листогибочных машинах (РЛГМ) находят широкое применение при изготовлении цилиндрических и конических обечаек и секторов. Ими оснащены как кузнечно-штамповочные, так и цеха обработки металлов резанием, ремонтно-механические подразделения, участки прокатных цехов. РЛГМ выпускаются для гибки заготовок толщиной от 1 до 300 мм и шириной листа до 13 м.

Основными преимуществами РЛГМ являются отсутствие необходимости в сменной технологической оснастке и их большая универсальность, благодаря чему применение этих машин экономически выгодно как при серийном, так и при индивидуальном производстве [1].

Путем соответствующей установки валков по отношению друг к другу заготовка может быть согнута на радиус, который в зависимости от моделей РЛГМ в 1,1-2,5 раза превышает радиус среднего валка, вокруг которого она огибается, и равен примерно 5-10 толщинам заготовки.

В промышленности преимущественно используются универсальные трех- и четырех- валковые РЛГМ. В симметричных трехвалковых РЛГМ положение среднего или боковых валков регулируется по высоте, что требуется при начальном изгибе заготовки и освобождении ее после гибки (рис.1а). Изредка в некоторых типах таких машин предусматривается возможность установки регулируемых валков под углом, что создает условие для гибки конических обечаек [2].

Преимуществами этих машин являются низкая стоимость, использование наиболее экономичного способа гибки толстых и тяжелых листов, высокая производительность вследствие наличия только одного регулируемого валка.

Существенным недостатком трехвалковых симметричных РЛГМ является невозможность согнуть заготовку по всей длине. Концы листа длиной, несколько меньшей расстояния между боковыми валками, остаются прямыми, так как они не могут быть пропущены через очаг деформации, находящийся под средним валком. Для получения строго цилиндрической обечайки концы заготовки предварительно подгибаются на кромкогибочном прессе, дополнительно устанавливаемом на участке. К затратам на приобретение кромкогибочных прессов для подгибки концов заготовки необходимо также добавить затраты на создание дополнительных производственных площадей.

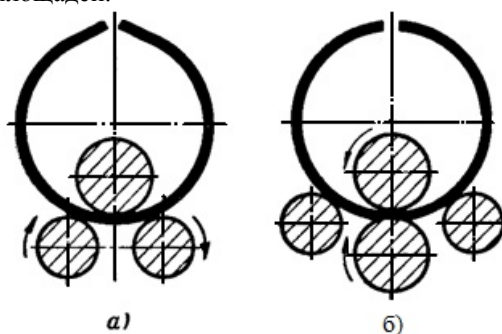


Рис.1 – Положение валков в РЛГМ:

а) трехвалковой симметричной; б) четырехвалковой

Для обеспечения возможности подгибки концов заготовки непосредственно на РЛГМ, а также для гибки толстых листов в настоящее время в большинстве своем используются четырехвалковые РЛГМ [2-5]. У этих машин под средним валком поставлен дополнительный нижний валок (рис.1б). Регулируется по высоте положение боковых валков, которые перемещаются как с сохранением горизонтального расположения осей, так и с отклонением осей от горизонтали. В ранних конструкциях РЛГМ приводным выполнялся только средний, а иногда

средний и нижний валки [1]. В современных конструкциях РЛГМ [2-5] приводы могут быть установлены на всех валках.

Гибка листов осуществляется между средним и боковыми валками, а нижний валок под действием пружин и гидроцилиндров давит на заготовку и тем самым создает большее тяговое усилие между заготовкой и приводным верхним валком.

Процесс гибки начинают с подгибки кромок. Заготовка заводится в валки до упора в противоположный боковой валок (рис.2а). Перемещением вверх нижнего валка заготовка зажимается между средним и нижним валками. Затем производится гибка заготовки на узком участке путем перемещения бокового валка (рис.2б). Включением вращения валков конец заготовки до самой кромки сгибается на конечный радиус (рис.2в). После этого валки устанавливаются по симметричной схеме и сгибается средний участок заготовки на промежуточный радиус (рис.2г). Подгибка второго конца заготовки осуществляется тем же способом, как и первого. Затем за один-два пропуска заготовка на среднем участке сгибается на окончательный радиус (рис.2д, е). Количество пропусков зависит от серийности заготовок и квалификации рабочего, занятого на гибочных работах.

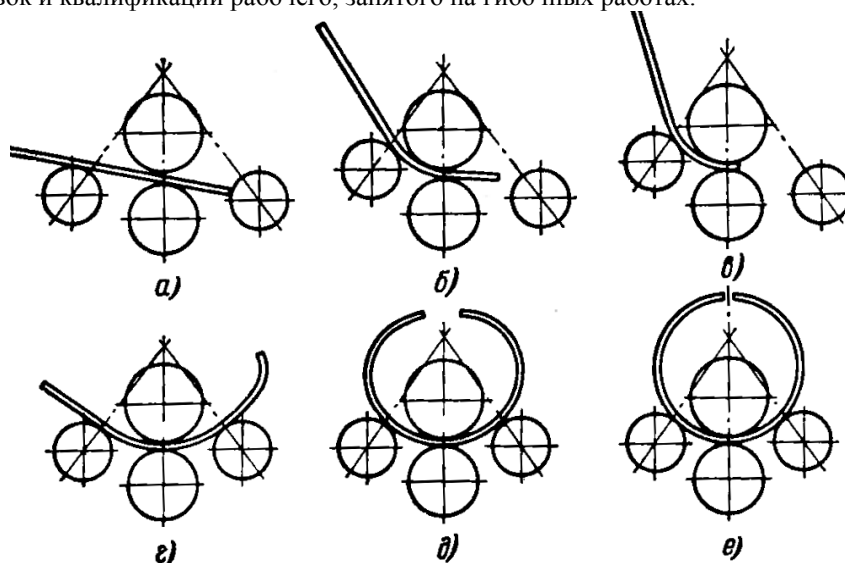


Рис.2 – Технология гибки цилиндрической обечайки на 4-хвалковой РЛГМ

Фирмой «Davi» [4] предложен планетарный привод для перемещения боковых валков по радиально-планетарной схеме (одновременно вверх и вправо), который используется сейчас многими производителями РЛГМ. Такой привод обеспечивает уменьшение минимального диаметра гнутых обечайек до величины, лишь на 10 % превышающей диаметр верхнего валка. Кроме того, уменьшается проскальзывание листа между валками и образование налета на поверхности валков.

Для каждого типа РЛГМ предельная толщина листовой заготовки и, следовательно, изготавливаемой обечайки диаметром  $D$  в первом приближении зависит от ширины листа  $b$  и предела текучести материала заготовки  $\sigma_T$ . При подгибке кромок на валках РЛГМ возникают более высокие усилия, чем при гибке среднего участка заготовки в валках, расположенных по симметричной схеме. По этой причине предельная толщина  $h$  сгибаемых на РЛГМ заготовок без подгибки кромок в 1,15-1,40 раза больше толщины заготовок  $h_1$ , получаемых с подгибкой кромок [1].

Однако в информации рекламного характера от производителей РЛГМ [2, 4] указывается, что новейшие образцы листогибочных машин обеспечивают соотношение толщин изготавливаемых обечайек в пределах  $h / h_1 = 1,1-1,2$  при условии, что длина прямолинейного участка кромки листа не превышает полутора толщин заготовки.

Отсутствие данных о взаимосвязи параметров  $h$ ,  $b$ ,  $\sigma_T$  и  $D$  для заготовок из различных марок сталей и сплавов, а также точного соотношения толщин  $h$  и  $h_1$  затрудняет проектирование технологических процессов и обуславливает дополнительный расход листового металла на эмпирический подбор параметров ротационной гибки.

**Цель статьи** – определение зависимостей предельных толщин  $h$  и  $h_1$  листовых заготовок из различных сталей при ротационной гибке цилиндрических обечаек на четырехвалковой листогибочной машине ИА 2426.

Исследования проводили в производственных условиях при серийном изготовлении цилиндрических обечаек диаметром  $D = 1000$  мм, шириной  $b = 500-3000$  мм и толщиной  $h = 20-90$  мм из сталей 20, 45, 09Г2С, St52-3, С235. Последние две марки стали являются аналогами отечественных сталей 17Г1С и Ст.3сп2.

Геометрические параметры и материал обечаек определялись заказчиками продукции, в связи с чем вместо экспериментального метода исследования использовали наблюдение и фиксацию параметров ротационной гибки большинства обечаек в каждой партии продукции.

РЛГМ модели ИА2426 имела следующие паспортные характеристики:

- ❖ наибольшая толщина листа (для металла с пределом текучести  $\sigma_T^H = 250$  МПа) –  $H = 40$  мм;
- ❖ наибольшая ширина обрабатываемого листа –  $L = 3150$  мм;
- ❖ диаметр верхнего валка –  $d = 380$  мм;
- ❖ диаметр двух боковых и нижнего валка –  $340$  мм;
- ❖ мощность привода –  $155$  кВт.

Боковые валки машины имели возможность вертикального соосного перемещения для подгибки кромок листов, а также приближения к верхнему валку в зоне откидной консоли с отклонением осей валков от горизонтали на  $10-12^\circ$ .

На рис.3,4 представлено влияние ширины листов и предела текучести обрабатываемых марок сталей на предельную толщину  $h$  и  $h_1$  цилиндрических обечаек.

Графики имеют вид степенных функций вида  $y = Kx^{-p/q}$  ( $p/q \geq 1$ ) [6], показывающих различное влияние ширины листа  $b$  и предела текучести  $\sigma_T$  исследуемых сталей на предельные значения  $h$  и  $h_1$ .

Из рис.3 следует, что с увеличением в 6 раз ширины листа его предельная толщина уменьшается в 2,0-2,1 раза при ротационной гибке без подгибки кромок и в 1,5-2,1 раза при гибке с подгибкой кромок. В абсолютных величинах толщины  $h$  и  $h_1$  изменяются в интервалах 88-32 и 62-22 мм при гибке соответственно с подгибкой и без подгибки кромок.

Изготовление обечаек из узких листов обуславливает разность толщин  $h - h_1 = 24$  мм для наименее прочной стали С235 и  $h - h_1 = 21$  мм для наиболее прочной стали 45. С увеличением ширины листов эта разность уменьшается и составляет 11 и 10 мм соответственно для сталей С235 и 45. Отношение величин  $h / h_1$  для всех сопоставимых графиков примерно одно и то же и находится в пределах 1,41-1,45, что несколько превышает указываемые в литературе значения 1,15-1,40 [1].

Замена стали С235 на сталь 45, то есть увеличение предела текучести в 1,6 раза вызывает снижение параметров  $h$  и  $h_1$  в 1,27-1,29 раза во всем диапазоне ширины листов (см. рис.4). При гибке заготовок с шириной в диапазоне  $b = 500-1000$  мм влияние параметров  $b$  и  $\sigma_T$  на значения  $h$  и  $h_1$  практически идентично. При значениях  $b > 1000$  мм предел текучести  $\sigma_T$  обрабатываемой стали в большей степени влияет на предельную толщину заготовок. Это влияние тем заметнее, чем больше ширина листа  $b$ .

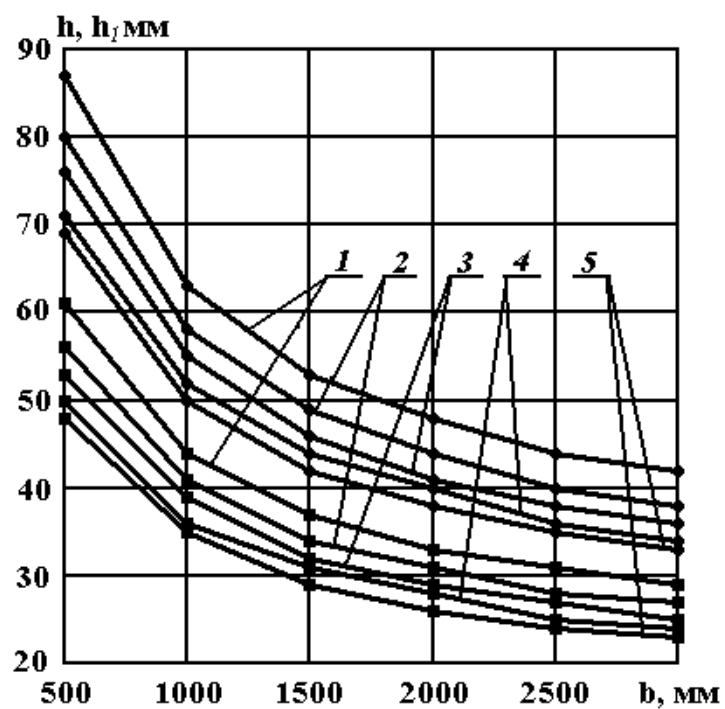


Рис.3 – Влияние ширины листа на предельную толщину цилиндрических обечаек:  
 1 – С235; 2 – сталь 20; 3 – 09Г2С; 4 – St.52-3; 5 – сталь 45;  
 ● – гибка без подгибки кромок; ■ – гибка с подгижкой кромок

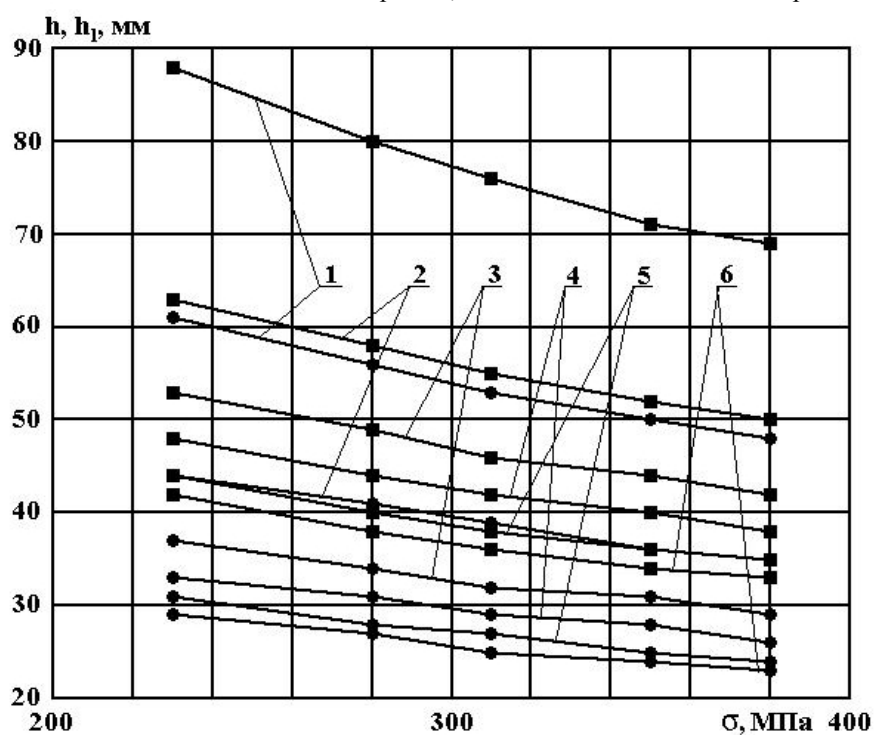


Рис.4 – Влияние предела текучести стального листа на предельную толщину цилиндрических обечаек при ширине листовых заготовок:  
 1 – 500 мм; 2 – 1000 мм; 3 – 1500 мм; 4 – 2000 мм; 5 – 2500 мм; 6 – 3000 мм  
 ■ – гибка без подгибки кромок; ● – гибка с подгижкой кромок

Графики (рис.3, 4) показывают, что паспортное значение максимальной толщины листовых заготовок (40 мм) для ротационной гибки на РЛГМ модели ИА2426 является условным параметром. Только при выборе наименее прочной стали С235 удастся изготовить обечайки с толщиной стенок, равной или превышающей 40 мм в диапазоне ширины листов вплоть до 3000 мм.

Обработка графиков в программе Advanced Grapher позволила установить, что они с приемлемой для технических расчетов погрешностью могут быть аппроксимированы формулами, приведенными в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Формулы для расчета предельных толщин заготовок при гибке на РЛГМ различных марок сталей

Марка стали	Усредненный предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Формулы для расчета	Коэффициент корреляции $R^2$	Стандартное отклонение, S
С235	235	$h = 24942 b + 31$	0,995	1,246
		$h_1 = 19001 b + 24$	0,995	0,868
Сталь 20	280	$h = 21361 b + 27$	0,992	1,397
		$h_1 = 15334 b + 20$	0,992	1,000
09Г2С	312	$h = 23881 b + 29$	0,994	1,011
		$h_1 = 16574 b + 21$	0,990	1,034
St.52-3	352	$h = 21818 b + 28$	0,990	1,406
		$h_1 = 15030 b + 19$	0,992	0,883
Сталь 45	378	$h = 26842 b + 34$	0,994	1,041
		$h_1 = 17388 b + 22$	0,993	0,801

Таблица 2

Формулы для расчета предельных толщин заготовок различной ширины при гибке на РЛГМ

Ширина листа, мм	Формулы для расчета	Коэффициент корреляции $R^2$	Стандартное отклонение, S
500	$h = -1,28 \sigma + 117$	0,984	0,472
	$h_1 = -0,87 \sigma + 81$	0,992	0,462
1000	$h = -0,87 \sigma + 83$	0,992	0,462
	$h_1 = -0,62 \sigma + 58$	0,993	0,319
1500	$h = -0,73 \sigma + 69$	0,998	0,469
	$h_1 = -0,51 \sigma + 49$	0,982	0,409
2000	$h = -0,65 \sigma + 62$	0,992	0,355
	$h_1 = -0,45 \sigma + 44$	0,985	0,331
2500	$h = -0,60 \sigma + 57$	0,975	0,586
	$h_1 = -0,47 \sigma + 41$	0,989	0,282
3000	$h = -0,60 \sigma + 55$	0,950	0,566
	$h_1 = -0,41 \sigma + 38$	0,976	0,345

Формулы в табл.1, 2 пригодны для ротационной гибки на машине ИА2426. Представляется целесообразным на основе полученных промышленных результатов определить более универсальные функциональные зависимости, пригодные для расчетов техпроцессов на других РЛГМ.

Справочник [6] рекомендует следующий вид искомых формул:

$$\frac{h}{H}; \frac{h_1}{H} = f \frac{b}{L} \times \frac{\sigma_T}{\sigma_T^{\Pi}}^{-p \cdot q}$$

Анализ графиков на рис.4 показал, что изменение параметров  $h$ ,  $h_1$  обратно пропорционально  $\overline{\sigma_T}$  материала обечайки. Для большинства РЛГМ паспортные характеристики технологических возможностей машин относятся к деформируемым листам из материала, для которого  $\sigma_T^{\Pi} = 250$  МПа. Это позволяет константу  $\sigma_T^{\Pi}$  учесть при определении коэффициентов аппроксимации. С учетом этого, графики на рис.3, 4 были аппроксимированы формулами вида:

$$\begin{aligned} \frac{h}{H} &= \sigma_T^{-0,5} \left( k_1 \frac{b^3}{L} + k_2 \frac{b^2}{L} + k_3 \frac{b}{L} + k_4 \right), \\ \frac{h_1}{H} &= \sigma_T^{-0,5} \left( k_5 \frac{b^3}{L} + k_6 \frac{b^2}{L} + k_7 \frac{b}{L} + k_8 \right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} k_1 &= -63,28; & k_2 &= 142,15; & k_3 &= -112,24; & k_4 &= 47,59; \\ k_5 &= -73,43; & k_6 &= 149,40; & k_7 &= -98,92; & k_8 &= 35,64. \end{aligned}$$

Уменьшение в 1,41-1,45 раза предельной толщины заготовок при необходимости подгибки кромок является существенным недостатком четырехвалковых РЛГМ. Толщину  $h_1$  можно увеличить за счет использования возможности привода машины ИА2426 поджимать боковые валки к верхнему с отклонением их осей от горизонтали. В этом случае (см. рис.2б, в) левый боковой валок подгибает кромку листа не по всей его ширине, а только на угловом участке, прилегающем к откидной консоли машины. После ротационной гибки на промежуточный радиус (рис.2г) по симметричной схеме расположения валков осуществляют подгибку противоположного углового участка листа, примыкающего к откидной консоли. Подгибку производит правый боковой валок при его поджатии к верхнему валку с поднятием оси на угол 10-12° к горизонтали. Затем изогнутую на промежуточный радиус заготовку с подогнутыми в углах листа кромками извлекают из машины.

Второй цикл операций начинают с поворота изогнутой заготовки на 180°, заведения ее в валки и подгибки оставшихся двух угловых участков кромок листа таким же путем, как и на первом цикле операций.

Третий цикл операций повторяет схему деформирования на рис.2. Однако подгибка боковыми валками с параллельным расположением их осей происходит путем деформирования только центральных участков кромок листа. Три цикла подгибки позволили в 2,5-3,5 раза уменьшить ширину кромок листа, деформируемых за один цикл, и, следовательно, увеличить предельную толщину  $h_1$ . В частности, предлагаемая технология позволила изготовить цилиндрические обечайки диаметром 1000 мм и шириной 2000 мм из сталей 20 и 09Г2С с толщиной стенки 36 мм. Рост предельной толщины  $h_1$  составил соответственно 16 и 24 %.

Технология может быть применена, в основном, в мелкосерийном производстве, поскольку из-за трехциклового ротационной гибки трудоемкость возросла в 2,4-2,8 раза.

### Выводы

1. Установлена графическая и аналитическая взаимосвязь между пределом текучести, шириной и толщиной листов при ротационной гибке. Рост ширины листов от 500 до 3000 мм приводит к уменьшению их предельной толщины в 2-2,5 раза. Увеличение предела текучести в 1,6 раза обуславливает снижение предельной толщины листов в 1,27-1,29 раза.

2. При подгибке кромок предельная толщина листов уменьшается на 21-24 мм при ширине листов 500 мм и на 10-11 мм при ширине листов 3000 мм. Соотношение этих толщин для всех сопоставимых графиков находится в пределах 1,41-1,45.

3. Предельная толщина листа при ротационной гибке с подгибкой кромок может быть увеличена на 16-24 % за счет предварительной подгибки угловых участков листов при попеременном поджатии к верхнему валку боковых валков с отклонением их осей от горизонтали.

*Перечень ссылок*

1. Мошнин Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах / Е.Н. Мошнин.- М.: Машиностроение, 1967.- 412 с.
2. Production MG.- [www.mgsrl.com](http://www.mgsrl.com).
3. VOLZ Maschinenhandel.- [www.volz-witthen.de](http://www.volz-witthen.de).
4. DAVI. Excellence in forming.- [www.davi.com](http://www.davi.com).
5. Haeusler. The forming factory- [www.haeusler.com](http://www.haeusler.com).
6. Вірченко Н.О. Графіки елементарних та спеціальних функцій: Довідник / Н.О. Вірченко, І.І. Ляшко.- Київ: Наукова думка, 1996.- 583 с.

Рецензент:  
Самотугин С.С.,  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 26.12.2014