

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук, А.Г. ГЕРАСИМОВА,  
М.И. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук (БНТУ)

## РАСЧЕТ УШИРЕНИЯ КОНЦЕВЫХ ЧАСТЕЙ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ НА ОПРАВКЕ

В последнее время в отечественном машиностроении широко применяются малолистовые рессоры из листов переменной толщины. Это объясняется существенными преимуществами таких рессор (уменьшение металлоемкости, трудоемкости сборки, снижение массы автомобиля, увеличение ресурса эксплуатации) по сравнению с традиционно применяемыми многолистовыми рессорами.

Один из способов производства рессорных листов переменной толщины [1], а также разработанные на его основе технология и оборудование внедрены на Минском рессорном заводе и применяются в производстве малолистовых рессор для автомобилей семейства МАЗ, МАЗ-МАН. Существенное отличие данного способа от ранее известных заключается в том, что полосовая заготовка после нагрева в индукторе подается в прокатный стан, где прокатывается на перемещающейся профилированной оправке в неприводных валках при жестко фиксированном зазоре между ними. Таким образом, профилирование полосовых заготовок обеспечивается соответствующим контуром рабочих поверхностей подвижной оправки. Данный способ отличается высокой производительностью, простотой оборудования и надежностью. Однако при его реализации выявился существенный недостаток – уширение концевых частей полосы, связанное с изменением обжатия по ее длине (рис. 1).

Одно из основных требований к рессорным листам – обеспечение точных геометрических размеров профиля по длине полосы. В то же время уширение концевых участков приводит к тому, что для получения точных размеров по ширине требуется дополнительная операция – фрезерование или обрезка концов прокатанной полосы по ширине.

Исходя из вышесказанного необходимо было определить фактическое значение уширения при существующей технологии и разработать способы, позволяющие значительно снизить эту величину. С этой целью был выполнен теоретический анализ факторов, влияющих на уширение, с пос-

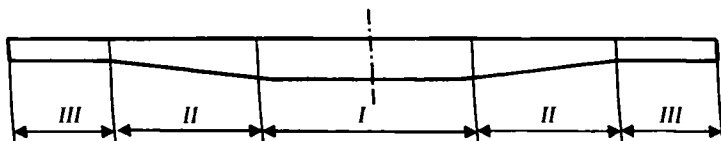


Рис. 1. Форма профилированной заготовки малолистовой рессоры:

I – центральная часть; II – параболический или клиновой профиль; III – концевые гладкие участки

ледующим проведением экспериментов на установке с приводными валками и оправкой прямоугольного сечения.

Для моделирования процесса горячей прокатки использовали свинцовые заготовки, так как свинец обладает механическими свойствами (предел текучести, относительное удлинение), сравнимыми по значению с механическими свойствами рессорной стали при температуре 1100...1150 °С [2, 3].

Для снижения уширения на оправке были выполнены продольные канавки, в результате чего на поверхности образовались выступы трапецеидальной и впадины треугольной формы с углом  $2\alpha$  при вершине (рис. 2).

Продольные канавки (риски) на инструменте приводят к анизотропии трения [4]. Скольжение металла по инструменту поперек канавок будет затруднено в большей степени, чем вдоль. Коэффициент трения при скольжении металла поперек направления рисок, появляющихся в результате механической обработки рабочего инструмента, примерно на 20% выше, чем при движении металла вдоль направления обработки [5].

Заготовка при прокатке по ширине делится на зону прилипания, которая находится в центральной части заготовки, и краевую зону [6]. В зоне прилипания уширение практически отсутствует, так как прокатываемый металл прилипает к инструменту и движение его внутри зоны происходит преимущественно в направлении прокатки [7]. Только в двух крайних зонах шириной  $b_k$  металл может перемещаться в стороны, вызывая уширение (рис. 3). Вследствие этого канавки выполняли на участках определенной ширины по краям оправки.

Для определения протяженности краевой зоны использовали эмпирическую формулу [6]

$$b_k = Ch_0 + \frac{h_0}{f} \frac{\xi - f}{\xi + f},$$

где  $C = 0,575$ ;  $f$  – коэффициент трения;  $\xi$  – коэффициент, равный 0,6.

С целью определения коэффициентов трения при прокатке на оправке с продольными канавками рассмотрим модель, базирующуюся на анализе особенностей локального контакта и учитывающую геометрические параметры пятен касания [8]. Для теоретического анализа в качестве расчетной примем схему, показанную на рис. 2.

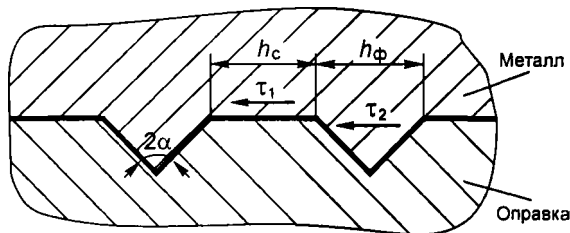


Рис. 2. Профиль поверхности оправки

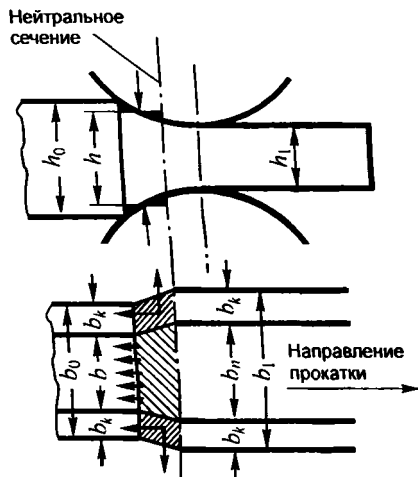


Рис. 3. Влияние прилипания заготовки к валкам на уширение

Так как контакт поверхности оправки с металлом дискретен и неоднороден, то сила трения представляет собой сумму элементарных сил трения, возникающих на отдельных площадках касания [9]:

$$T_{\Sigma} = \Sigma T_1 + \Sigma T_2,$$

где  $T_1$  – сила трения, действующая на свободной площадке касания шириной  $b_c$ ;  $T_2$  – сила трения, действующая на фактической площадке касания шириной  $b_{\phi}$ .

В свою очередь

$$T_{\Sigma} = \tau_1 b_c n + \tau_2 b_{\phi} m, \quad (1)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – касательные напряжения, действующие соответственно на свободной и на фактической площадке касания;  $n$  – количество площадок касания шириной  $b_c$ ;  $m$  – количество площадок касания шириной  $b_{\phi}$ .

На свободной поверхности контакта касательное напряжение можно выразить исходя из условия трения по Зибелю:

$$\tau_1 = f \sigma_t, \quad (2)$$

где  $f$  – коэффициент контактного трения;  $\sigma_t$  – предел текучести.

На фактической площадке касания коэффициент трения в поперечном направлении равен предельному значению ( $f = 0,577$  [4]) и соответственно касательное напряжение [8]

$$\tau_2 = k, \quad (3)$$

где  $k$  – сопротивление пластическому сдвигу.

Подставив (2) и (3) в выражение (1), получим

$$T_{\Sigma} = f\sigma b_c n + kb_{\phi}m.$$

Действующее на площадках среднее касательное напряжение

$$\tau_{cp} = T_{\Sigma} / B_{\Sigma},$$

где  $B_{\Sigma}$  – суммарная ширина касания:  $B_{\Sigma} = b_c n + b_{\phi} m$ .

Тогда средний коэффициент трения, действующий в поперечном направлении, можно выразить так:

$$f_y = \tau_{cp} / \sigma_t.$$

В продольном же направлении коэффициент трения  $f_x$  можно приближенно принять равным коэффициенту трения для случая прокатки на гладкой оправке.

При расчете уширения полосы необходимо учесть, что процесс прокатки на оправке является несимметричным, так как условия деформирования для верхнего вала и оправки различны. Исходя из этого значения коэффициентов контактного трения в поперечном и продольном направлениях брали усредненными по толщине заготовки:

$$f_{y(cp)} = \frac{f_y^{(1)} + f_y^{(2)}}{2}; \quad f_{x(cp)} = \frac{f_x^{(1)} + f_x^{(2)}}{2},$$

где  $f_y^{(1)}$ ,  $f_y^{(2)}$  – поперечный коэффициент контактного трения соответственно на верхнем валке и на оправке;  $f_x^{(1)}$ ,  $f_x^{(2)}$  – продольный коэффициент контактного трения соответственно на верхнем валке и на оправке.

Теоретический анализ уширения проводили для следующих случаев прокатки:

- 1) на гладкой оправке без смазки ( $f_y = f_x$ );
- 2) на гладкой оправке со смазкой, нанесенной на оправку ( $f_y k_{в.с} = f_x k_{в.с}$ , где  $k_{в.с}$  – коэффициент влияния смазки);
- 3) на оправке с параллельными канавками без смазки ( $f_y > f_x$ );
- 4) на оправке с параллельными канавками и со смазкой, нанесенной на оправку ( $f_y k_{в.с} > f_x k_{в.с}$ ).

Коэффициент контактного трения свинца по стали определяли экспериментально методом конических бойков (методом Губкина) [10]. Осадку образцов проводили со смазкой и без смазки. В качестве смазки применяли веретенное масло АУ ОСТ 3801412–86. Исходя из полученных данных рассчитали влияние смазки на коэффициент контактного трения:

$$k_{в.с} = f_1 / f_2,$$

где  $f_1$  – коэффициент контактного трения при наличии смазки;  $f_2$  – коэффициент контактного сухого трения.

Далее рассмотрим уширение полосы прямоугольного сечения при прокатке на оправке с продольными канавками.

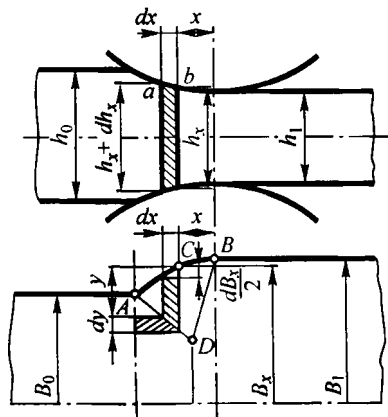


Рис. 4. Условный элементарный объем, смещающийся в уширение

Пусть условно весь объем металла в пределах боковой зоны  $ABD$  (рис. 4) будет деформироваться в направлении уширения.

Из равенства элементарных смещенных объемов можно записать:

$$h_x dx \frac{dB_x}{4} = -\frac{1}{2} y dh_x dx. \quad (4)$$

Из выражения (4)

$$dB_x = -2y \frac{dh_x}{h_x}. \quad (5)$$

Зависимость между  $y$  и  $h_x$  может быть найдена из условия, что в зоне уширения средние по высоте очага деформации поперечные напряжения  $\sigma_y$  и средние по высоте продольные напряжения  $\sigma_x$  должны быть приблизительно равны. Таким образом, если на протяжении всей границы зон  $\sigma_y = \sigma_x$ , то вдоль границы должно выполняться условие  $d\sigma_y = d\sigma_x$ .

Приближенно  $d\sigma_x$  можно выразить так [7]:

$$d\sigma_x = \left( 2\tau_s \mp \frac{\tau_x}{\operatorname{tg}\varphi} \right) \left( \frac{dh_x}{h_x} \right), \quad (6)$$

где  $\tau_x$  — контактные касательные напряжения, действующие в продольном направлении.

Аналогично из условия равновесия элемента металла шириной  $dy$  в направлении уширения находим

$$d\sigma_y = \left( \frac{2\tau_y}{h_y} \right) dy, \quad (7)$$

где  $\tau_y$  — контактные касательные напряжения, действующие в поперечном направлении.

Приравняв правые части выражений (6) и (7), легко найти значение

$$dy = \frac{1}{2} \left( \frac{2\tau_s}{\tau_y} \mp \frac{\tau_x}{\tau_y \operatorname{tg}\varphi} \right) h_y \frac{dh_x}{h_x}.$$

Значения  $\tau_x$  и  $\tau_y$  примем соответственно равными [11]:

$$\tau_y = f_y 2\tau_s; \quad \tau_x = f_x 2\tau_s,$$

откуда

$$dy = \frac{1}{2} \left( \frac{2\tau_s}{2f_y\tau_s} \mp \frac{2f_x\tau_s}{2f_y\tau_s \operatorname{tg}\varphi} \right) h_y \frac{dh_x}{h_x}. \quad (8)$$

Обозначив  $\operatorname{tg}\varphi = \Delta h / (2l)$ , после соответствующей подстановки в уравнение (8) будем иметь

$$dy = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{f_y} \mp \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) h_y \frac{dh_x}{h_x}.$$

Подставив  $h_x = h_1 + x \frac{\Delta h}{l}$  в последнее выражение, получим

$$dy = \left( \frac{\Delta h}{2f_y} \mp \frac{f_x}{f_y} \right) h_y \frac{dx}{h_1 + x(\Delta h/l)}.$$

Проинтегрировав данное выражение, найдем

$$y = \left( \frac{l f_x}{\Delta h f_y} \mp \frac{1}{2f_y} \right) h_y \ln \frac{h_0}{h_1 + x(\Delta h/l)}. \quad (9)$$

После подстановки (9) в уравнение (5) получим

$$dB_x = \frac{1}{f_y} \left( \frac{2l f_x}{\Delta h} \mp 1 \right) \ln \frac{h_1 + x(\Delta h/l)}{h_0} dh_x. \quad (10)$$

Величины  $h_x$  и  $h_y$ , входящие в уравнения (5) и (9), сокращаются, так как значения их вдоль линии  $AD$  равны.

После интегрирования выражения (10) и простых преобразований будем иметь

$$B_x = B_0 + \frac{1}{f_y} \left( \frac{2l f_x}{\Delta h} \mp 1 \right) \left( h_x \ln \frac{h_x}{h_0} - h_x + h_0 \right), \quad (11)$$

где  $h_x = h_1 + x(\Delta h/l)$ .

В выражении (11) знак « $\rightarrow$ » в первых скобках записывается для зоны отставания, знак « $\leftarrow$ » — для зоны опережения. Высоту нейтрального сечения, которое делит зону деформации на зоны отставания и опережения, определяем по формуле [7]

$$h_n = h_1 + 2R(1 - \cos \gamma_n),$$

где  $h_1$  – конечная ширина заготовки;  $R$  – радиус валков;  $\gamma_n$  – нейтральный угол.

Значение нейтрального угла находим по формуле [7]

$$\sin \gamma_n = 0,5 \sin \alpha - (1 - \cos \alpha) / (2f),$$

где  $\alpha$  – угол контакта прокатываемого металла с валками:

$$\alpha = \sqrt{(h_0 - h_1) / R}.$$

Для подтверждения теоретического анализа по определению уширения на экспериментальной установке (при различных условиях прокатки) были прокатаны свинцовые заготовки размерами  $h_0 = 22$  мм,  $B_0 = 90$  мм,  $L_0 = 140$  мм. После прокатки измерили уширение с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм.

Результаты расчетов и опытов по определению уширения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные и опытные значения уширения полосы

Вариант прокатки	$\Delta B$ , мм	
	Теоретические результаты	Эксперимент
Прокатка на гладкой оправке:		
без смазки	7,9	8,0
со смазкой	4,8	5,0
Прокатка на оправке с продольными канавками:		
без смазки	5,6	5,6
со смазкой	4,3	4,4

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1) результаты экспериментов показали удовлетворительную сходимость с опытными данными, что доказывает правильную постановку теоретической задачи;

2) продольная насечка на оправке снижает уширение на 20%, а при наличии смазки, нанесенной на оправку, – на 40% по сравнению с прокаткой на гладкой оправке. Вследствие этого можно существенно снизить объем металла, обрезаемого с концов прокатанной полосы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Изготовление полос переменной толщины для малолистовых рессор / А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич, В.А. Король, В.А. Томило // Кузнечно-штамповочное производство. 1997. № 6. С. 15 – 17.

2. Третьяков А.В., Трофимов Г.К., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1989. 544 с.

3. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
4. *Громов И.П.* Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1978. 360 с.
5. *Павлов И.М.* Теория прокатки. М.: Металлургия, 1950. 610 с.
6. *Гелеи Ш.* Расчет усилий и энергии при пластической деформации металлов. М.: Металлургиздат, 1958. 420 с.
7. *Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е.* Теория продольной прокатки. М.: Металлургия, 1980. 318 с.
8. *Макушок Е.М.* Самоорганизация деформационных процессов. Мн.: Навука і тэхніка, 1991. 272 с.
9. *Крагельский И.В.* Износ и трение. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
10. *Северденко В.П.* Лабораторный практикум по теории обработки металлов давлением. Мн.: Выш. шк., 1975. 304 с.
11. *Чекмарев А.П.* Теория прокатки // Мат-лы Всесоюз. науч.-техн. конф. «Теоретические проблемы прокатного производства». М.: Металлургия, 1975. С. 33–37.