

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.2

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук, Д.М. ИВАНИЦКИЙ (БНТУ)

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАЛОЛИСТОВЫХ РЕССОР

Основными причинами, обуславливающими отказ рессор, являются усталостные разрушения листов и износ концов в коренных листах. Реже встречаются срез и смятие центрального болта, износ пальца и втулки ушка, поломка кронштейнов, потеря упругих свойств подвески.

Очаги зарождения трещин находятся, как правило, на вогнутой (работающей на растяжение) поверхности листа и соответствуют местам контакта с соседними листами или деталями крепления рессор.

Известен способ упрочнения рессорных листов, при котором осуществляют дробную деформацию поверхности дробеструйной обработкой для повышения упрочнения металла путем создания на его поверхности напряжений сжатия [1]. Недостатки этого способа поверхностного упрочнения – повышенный шум, низкая экологичность, необходимость частой замены или очистки дробы, невозможность регулирования параметров процесса.

Предлагаемый способ поверхностного упрочнения заключается в дробной деформации при прокатке с созданием в поверхностном слое рессоры фасонной полосчатой деформированной структуры, состоящей из параллельных канавок периодического профиля (рис. 1).

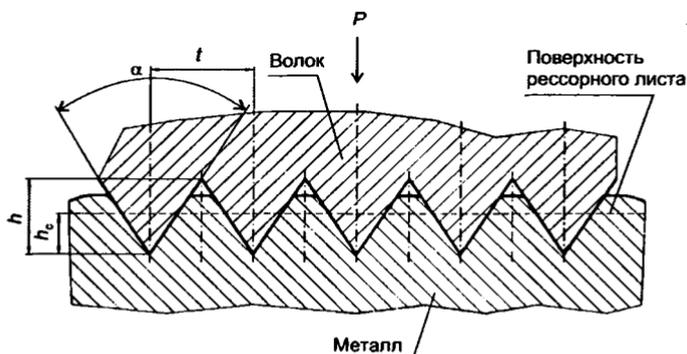


Рис. 1. Схема процесса деформирования

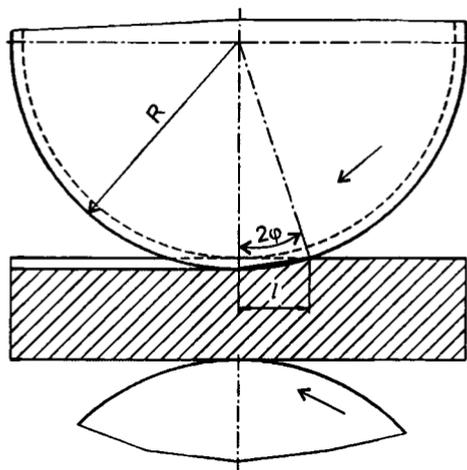


Рис. 2. Схема процесса прокатки

Полосчато-деформированную структуру выполняют на вогнутой стороне рессоры, так как она наиболее подвержена действию растягивающих напряжений, а во втором исполнении – на обеих сторонах. Чередующиеся канавки треугольного профиля с углом при вершине выступа  $\alpha$  и глубиной впадины  $h$  располагаются на поверхности с шагом  $t$  вдоль рессорных листов. Глубина внедрения колеблется в пределах  $0,8...1,2$  мм.

Направленная ориентация поверхностно-деформированных канавок образует полосчатую структуру (аналогично армирующим волокнам), которые обладают высокими механическими свойствами.

В результате такой обработки с плоских поверхностей рессорного листа удаляется окалина. Упрочненные канавки также являются препятствиями для лавинообразного распространения трещин по ширине рессорного листа.

При теоретическом анализе формирования рельефа в листовом материале будем рассматривать как процесс заполнения впадин деформирующего инструмента деформируемым металлом. Приближенная схема решения, основанная на усреднении напряжений в сечениях деформируемого металла и принятии упрощенного уравнения пластичности, соответствует реальному процессу для случаев малых значений коэффициента контактного трения на границе металла со стенками впадин и небольших углов уклона впадин [2, 3].

Чтобы упростить дальнейшие выводы, заменим дугу контакта металла с валком хордой (рис. 2). Выделим этот участок для одной

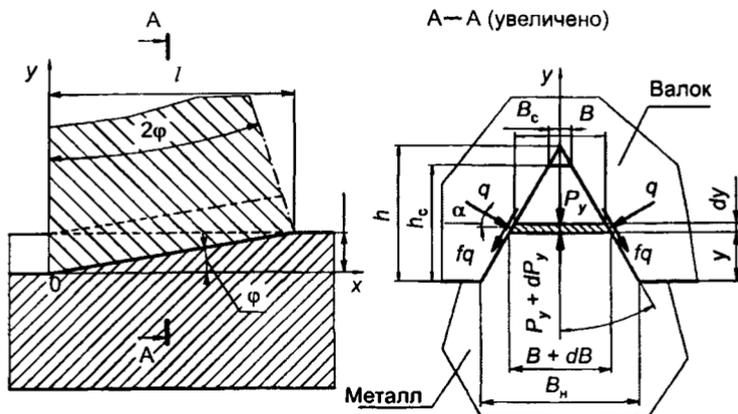


Рис. 3. Схема формообразования рельефной поверхности

канавки. С целью получения решения профиль кольцеобразной впадины представим в виде треугольника (рис. 3).

Уравнение равновесия выделенного элемента единичной длины в деформируемом металле для произвольного поперечного сечения впадины запишем в виде

$$(P_y + dP_y)(B + dB) - P_y B - 2q \frac{dy}{\cos \alpha} \sin \alpha - 2fq \frac{dy}{\cos \alpha} \cos \alpha = 0,$$

где  $P_y$  – напряжение, действующее в вертикальном направлении в выделенном элементарном сечении;  $B$  – ширина выделенного элементарного сечения;  $q$  – напряжение, действующее на контакте между стенкой впадины и металлом в выделенном элементарном сечении.

Подставляя в данное уравнение значение  $dy = \frac{dB}{2\operatorname{tg}\alpha}$  и пренебрегая бесконечно малыми величинами второго порядка, получаем:

$$dP_y - (q - P_y) \frac{dB}{B} - \frac{fq}{\operatorname{tg}\alpha} \frac{dB}{B} = 0. \quad (1)$$

Будем считать деформацию в зоне затекания металла во впадину двухмерной, поскольку при поверхностно-пластической деформации вытяжка вдоль листа практически отсутствует. Далее принимаем, что главные оси напряжений в рассматриваемом элементе соответствуют вертикальным и горизонтальным осям. Тогда можно записать [4]:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \beta \sigma_T, \quad (2)$$

где  $\sigma_1 = q \frac{dy}{\cos \alpha} \cos \alpha - f q \frac{dy}{\cos \alpha} \sin \alpha$ ;  $\beta$  – параметр Лодэ;  $\sigma_\tau$  – предел текучести стали.

Вторым членом правой части последнего выражения можно пренебречь ввиду его незначительности по сравнению с первым. В этом случае  $\sigma_1 = q$  или  $\sigma_2 = P_y$ . На этом основании условие (2) примет вид  $q - P_y = \beta \sigma_\tau$ . Подставив данное выражение в уравнение (1), получим:

$$dP_y - \beta \sigma_\tau \frac{dB}{B} - \frac{f(\beta \sigma_\tau + P_y)}{\operatorname{tg} \alpha} \frac{dB}{B} = 0.$$

После преобразования запишем:

$$dP_y = \left[ \beta \sigma_\tau - \frac{f(\beta \sigma_\tau + P_y)}{\operatorname{tg} \alpha} \right] \frac{dB}{B}.$$

Введем обозначение:

$$\delta = \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент контактного трения;  $\alpha$  – угол наклона стенки канавки.

Разделим переменные:

$$\frac{dP_y}{\beta \sigma_\tau + \delta(\beta \sigma_\tau + P_y)} = \frac{dB}{B}.$$

Проинтегрируем данное выражение:

$$\ln [\beta \sigma_\tau + \delta(\beta \sigma_\tau + P_y)] = \delta \ln B + C,$$

а затем преобразуем его к виду  $\beta \sigma_\tau + \delta(\beta \sigma_\tau + P_y) = CB^\delta$ . Тогда

$$P_y = CB^\delta - \beta \sigma_\tau \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right). \quad (4)$$

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий, согласно которым при  $B = B_c$ , т.е. на свободной поверх-

ности деформируемого участка металла,  $P_y = 0$ . Тогда можно записать:

$$C = \frac{\beta\sigma_T(1+1/\delta)}{B_c^\delta}.$$

Подставив это значение в уравнение (4), окончательно получим:

$$P_y = \beta\sigma_T \left\{ \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^\delta - 1 \right] \right\}. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что при заполнении впадины металлом, когда  $B_c \rightarrow 0$ , среднее нормальное напряжение  $P_y \rightarrow \infty$ . Это вполне логично, если учесть, что задача рассматривается как двухмерная. С увеличением параметра  $B$  до значения  $B_n$  (номинальный шаг кольцеобразных канавок) при неизменном  $B_c$  также происходит рост величины  $P_y$ , что не лишено физического смысла.

Для определения усилия деформирования, приходящегося на единицу длины очага деформации в произвольном сечении очага деформации, выражение (5) необходимо проинтегрировать в пределах изменения самой функции:

$$P_{\text{ед}} = \int_{B_n}^{B_c} \beta\sigma_T \left\{ \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^\delta - 1 \right] \right\} dB = \beta\sigma_T \left\{ \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) (\delta+1) \left[ \frac{B^{\delta+1}}{B_c^\delta} - B_c \right] - B_n + B_c \right\}. \quad (6)$$

Далее определим усилие деформирования при заполнении впадины на длине  $l$  (см. рис. 3) проекции хорды, наклоненной к оси  $x$  под углом  $\varphi$ . Из рис. 3 следует, что переменная величина  $B_c$  является функцией координаты  $x$  и, согласно рис. 1, связана с ней следующей зависимостью:

$$B_c = 2ax,$$

где  $a = \text{tg}\alpha \text{tg}\varphi$ .

Далее определим угол  $\varphi$ . На основании рис. 3 можно записать:

$$\varphi = \frac{\arccos \frac{R-h_c}{R}}{2}, \quad (7)$$

где  $R$  – радиус вала прокатного стана;  $h_c$  – глубина внедрения профилированного вала в металл.

Проинтегрируем выражение (6) в пределах изменения данной функции, введя при этом замену  $B_c = 2ax$ :

$$\begin{aligned}
 P &= \int_0^l P_{ca} dx = \\
 &= \beta \sigma_{\tau} \int_0^l \left\{ \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) (\delta + 1) \left[ \frac{B_n^{\delta+1}}{(2ax)^{\delta}} - 2ax \right] - B_n + 2ax \right\} dx = \\
 &= \beta \sigma_{\tau} \left\{ \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) (\delta + 1) \left[ \frac{B_n^{\delta+1}}{2a(1-\delta)} (2al)^{1-\delta} - al^2 \right] - B_n l + al^2 \right\}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Для определения полного усилия нужно учесть количество канавок на бочке вала, которые внедряются в металл (рис. 4):

$$n = B_b / B_n,$$

где  $B_b$  – ширина бочки вала, равная ширине обрабатываемого рессорного листа.

В этом случае выражение (8) для определения полного усилия деформирования примет следующий вид:

$$P_n = Pn = \frac{\beta \sigma_{\tau} B_b}{B_n} \left\{ \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) (\delta + 1) \left[ \frac{B_n^{\delta+1}}{2a(1-\delta)} (2al)^{1-\delta} - al^2 \right] - B_n l + al^2 \right\}. \quad (9)$$

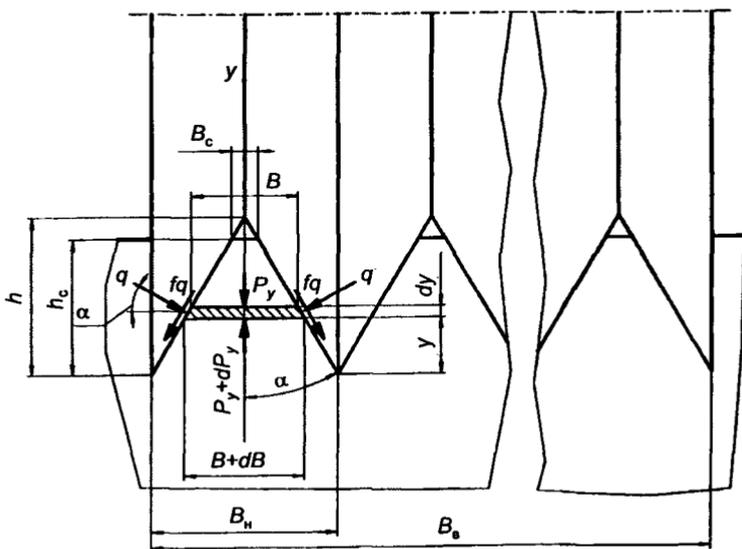


Рис. 4. Схема для определения полного усилия

При расчетах необходимо учитывать упрочнение металла, которое характеризуется напряжением текучести для любого момента деформации до начала образования шейки  $\sigma_s$ . Напряжение текучести определим по формуле С.И. Губкина [5]:

$$\sigma_{s_1} = \sigma_T + \left( \frac{\sigma_B}{1 - \psi_w} - \sigma_T \right) \left( \frac{\psi}{\psi_w} \right)^{\frac{\sigma_B \psi_w}{(1 - \psi_w) [\sigma_B - \sigma_T (1 - \psi_w)]}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести, для рессорной стали при твердости 42...46 HRC равен 1300 МПа [6];  $\sigma_B$  – предел прочности исходного материала, для рессорной стали при твердости 42...46 HRC равен 1500 МПа [6];  $\psi_w$  – относительное изменение площади поперечного сечения образца в момент образования шейки, для рессорной стали принимаем равным предельному значению  $\psi = 10\%$  в момент разрушения образца (будем считать, что у закаленной стали эта величина не изменяется с момента начала образования шейки до разрушения) [6];  $\psi$  – относительное уменьшение площади поперечного сечения.

Относительное уменьшение площади сечения определим по формуле

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0}, \quad (11)$$

где  $F_0$  – площадь сечения канавок для расчетов;  $F$  – площадь сечения, заполненная металлом после деформирования.

При внедрении валка в рессорный лист на глубину, равную половине глубины канавки, объем металла с площадью сечения  $F$  (рис. 5) перемещается и заполняет впадину, площадь сечения которой  $F_0$ . Для теоретических расчетов примем следующие значения параметров: глубина канавки  $h = 2,165$  мм; глубина внедрения выступа равна половине глубины канавки ( $h_1 = 1,08$  мм); ширина канавки  $t = 2,5$  мм; ширина впадины на валке на половине глубины канавки  $t_1 = 1,25$  мм.

По формуле (11) найдем уменьшение площади сечения:  $\psi = 0,25$ , а по формуле (10) напряжение текучести  $\sigma_{s_1} = 1882,5$  МПа.

В теоретических расчетах необходимо использовать среднее значение напряжения текучести, которое определяется по формуле [5]

$$\sigma_s^* = \frac{\sigma_s + \sigma_{s_1}}{2} = 1591,3 \text{ МПа,}$$

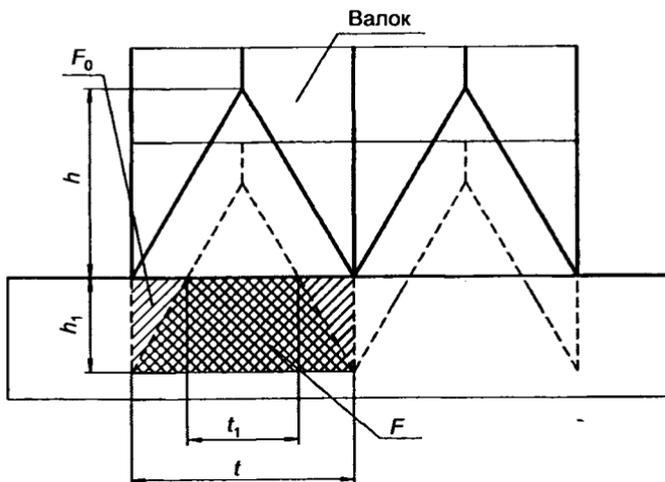


Рис. 5. Схема для определения степени деформации

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести стали в исходном состоянии, равное 1300 МПа.

По формуле (3) определим  $\delta$ , приняв коэффициент контактного трения  $f = 0,15$  и угол наклона стенки канавки  $\alpha = 30^\circ$ . Получим  $\delta = 0,26$ .

По формуле (7) определим величину угла  $\varphi$ , приняв радиус вала  $R = 95$  мм:  $\varphi = 4,32^\circ$  и параметр  $a = 0,044$ .

Длину проекции хорды на ось  $x$  найдем по формуле

$$l = R \sin 2\varphi = 14,2 \text{ мм.}$$

Принимая во внимание полученные значения и учитывая ширину канавки  $B_n = 2,5$  мм, ширину профилированного вала  $B_b = 90$  мм и параметр Лодэ  $\beta = 1,15$  [5], по выражению (9) определим полное усилие деформирования:  $P_n = 2\,242\,549 \text{ Н} \approx 2243 \text{ кН}$ .

Полное усилие деформирования необходимо знать для того, чтобы подобрать механизм поджима инструмента, который обеспечивал бы постоянное по значению усилие поджатия верхнего вала к рессорному листу переменной по длине толщины.

Проведенные эксперименты показали, что при усилии поджима  $P_n = 2243 \text{ кН}$  глубина канавок составляла 1,15 мм, что на 6,5% больше расчетного. Это вполне согласуется с физическими представлениями о механизме деформирования, поскольку в расчетах был использован метод нижней оценки (метод плоских сечений).

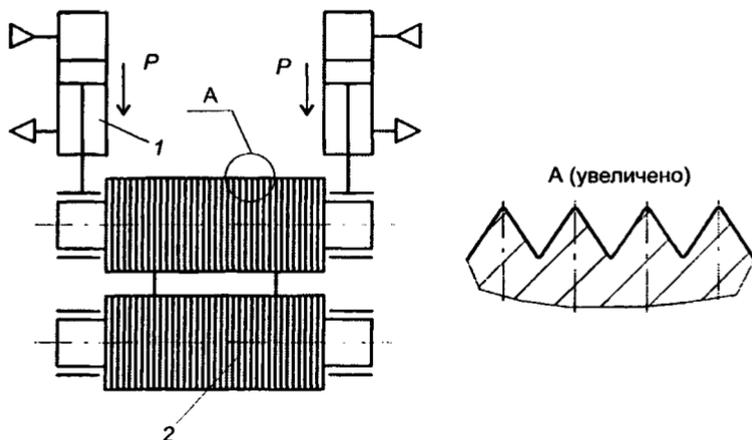


Рис. 6. Схема стана для поверхностного упрочнения рессорных листов

Прокатный стан для поверхностного упрочнения рессорных листов (рис. 6) состоит из рабочей клетки 1 с двумя приводными валками и механизма поджима верхнего валка 2. Рабочая клетка – коробчатой формы, что обеспечивает необходимую жесткость, позволяющую достигать необходимой глубины внедрения профильного валка в обрабатываемый металл.

Механизм поджима верхнего валка выполнен из двух связанных между собой и закрепленных на рабочей клетке пневмоцилиндров. Рабочим газом в цилиндрах является азот. Механизмы управления цилиндрами позволяют плавно регулировать рабочее давление в обоих цилиндрах синхронно. Это дает возможность изменять усилие поджима и глубину профилирования.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний рессорных листов на циклическую прочность, число циклов

Способ упрочнения	Номер образца					Среднее значение циклов
	1	2	3	4	5	
Без поверхностного упрочнения [2]	10 678	11 528	11 332	11 064	11 176	11 022
Обработка дробью	13 347	14 410	14 166	13 830	13 970	13 778
Упрочнение	18 200	18 470	17 670	18 017	17 555	17 893

Поверхность бочки валка образована кольцеобразными выступами и впадинами регулярного профиля с шагом  $t$ , величиной углубления  $h$  и углом при вершине выступа  $\alpha = 60^\circ$ . Для экспериментов был выбран профиль с шагом  $t = 2,5$  мм.

В табл. 1 приведены результаты сравнительных испытаний рессорных листов на циклическую прочность.

Результаты испытаний показали, что прочность листов после использования новой технологии увеличивается на 30% по сравнению с базовой дробеструйной обработкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ракицкий, А.А. Обеспечение ресурса рессорных подвесок / А.А. Ракицкий, А.К. Бернацкий. Мн.: Наука и техника, 1988. 166 с.
2. Колесниченко, Б.П. Отпечатываемость шероховатости валков на лосе при холодной прокатке и дрессировке / Б.П. Колесниченко, В.Л. Мазур, А.П. Качайлов // Листопрокатное производство. 1972. № 1. С. 76 – 80.
3. Мазур, В.Л. Производство листа с высококачественной поверхностью / В.Л. Мазур. Киев: Техника, 1982. 166 с.
4. Целиков, А.Я. Теория продольной прокатки / А.Я. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
5. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. М.: Высшая школа, 1963. 390 с.
6. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 1 / В.И. Анурьев. М.: Машиностроение, 1980. 728 с.

УДК 621.77

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук,  
А.В. МАЗУРЕНКО,  
А.В. ШИМАНСКИЙ (БНТУ),  
М.И. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук (РУП «МАЗ»)

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ФЛАНЦА В ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКЕ

При изготовлении трубчатых деталей с фланцем широко используется процесс отбортовки, осуществляемый за счет растяжения металла по краю полой заготовки [1–3]. Отбортовке предшествует процесс раздачи заготовки с последующим формированием