

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО ПЕРЕРАБОТКЕ МЕТОДОМ РАССОГЛАСОВАННОЙ ПРОКАТКИ

Акимов В. А., Гончарова С. В., Беляцкая Л. Н.

*Белорусский национальный технический университет*

**Введение.** Актуальность данной работы тесным образом связана с экологической безопасностью Беларуси, что, в первую очередь, и побудило творческий коллектив к ее написанию. Опишем проблему вкратце.

Переработка изношенных автомобильных шин становится насущной проблемой во всем мире. С ежегодным увеличением производства колесных транспортных средств растут и объемы отслужившей резины. В развитых странах мира этой проблеме уделяется больше внимания, так как широкое распространение автомобильного транспорта у них наступило раньше, и они поняли какую экологическую угрозу несут залежи складированных и медленно разлагающихся покрышек.

Переработка шин в отдельных государствах заключается в их вывозе в более бедные страны, также их используют в качестве топлива, измельчают в резиновую крошку, которую используют в качестве строительного материала для стадионов, дорожных покрытий и детских площадок. Однако значительная часть бывших в употреблении шин в мире продолжает складываться в захоронения и отравлять окружающую среду. Хотя автомобильная резина разлагается в природе за длительный период.

В нашей республике пока основная часть изношенной резины используется в качестве топлива. Крупнейшие потребители – это «Красносельскстройматериалы» и Белорусский цементный завод. Небольшие предприятия, утилизирующие резину, используют механическое оборудование для измельчения покрышек в резиновую крошку.

Экологическая переработка шин требует значительных капиталовложений. Современное оборудование требует значительных капиталовложений, и, хотя оно окупается быстро и способно приносить большую прибыль, не все страны в состоянии найти средства до нескольких миллионов евро на перерабатывающий завод, чтобы очистить свою территорию от использованных автомобильных покрышек. Таким образом, переработка шин продолжает оставаться нерешенной проблемой для Беларуси.

На первом этапе научных исследований, с целью оценки возможностей разрушение материала, предлагается получить формулы для вычисления усилий, создаваемых устройствами типа прокатного станка и наметить пути дальнейшего решения этой задачи. Ее успешное решение позволит конструктору осуществить выбор той или иной конкретной схемы разрушающего устройства в зависимости от силовых и энергетических характеристик [1, 2].

Для определенности рассмотрим двухслойный композиционный материал подверженный продольным сдвиговым деформациям и нормальному обжатию. Пусть радиусы валков равны между собой  $R_1 = R_2 = R$  и имеется рассогласования скоростей  $\omega_1 > \omega_2$ ,  $h = h_1 + h_2$  – толщина элемента покрышки,  $\varphi_0$  – угол захвата (рисунок 1).

Тогда нормальные и сдвиговые усилия в сечении будут рассчитываться по формулам:

$$\sigma = \frac{2ER}{h} (\cos \varphi - \cos \varphi_0), \quad (1)$$

$$\tau = \frac{G(1 - \omega_2 / \omega_1)R\varphi_0}{h - 2R(\cos \varphi - \cos \varphi_0)}. \quad (2)$$

Среднее значение величин  $\sigma$  и  $\tau$  можно охарактеризовать при помощи соотношений  $\sigma_{cp}^{(1)} = \frac{1}{\varphi_0} \int_0^{\varphi_0} \sigma d\varphi$ ,  $\tau_{cp}^{(1)} = \frac{1}{\varphi_0} \int_0^{\varphi_0} \tau d\varphi$  или  $\sigma_{cp}^{(2)} = \sigma(\varphi = \frac{\varphi_0}{2})$ ,  $\tau_{cp}^{(2)} = \tau(\varphi = \frac{\varphi_0}{2})$ . Для второго случая воспользовавшись геометрией задачи на (рисунок 1), получим:

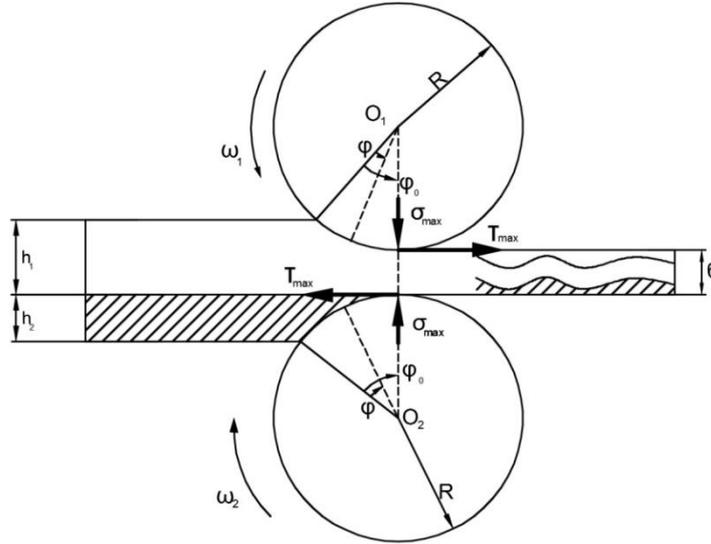


Рис.1. Схема разрушающего устройства

$$\sigma_{cp}^{(2)} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\delta}{h}\right) E, \quad (3)$$

$$\tau_{cp}^{(2)} = \frac{2G(1 - \omega_2 / \omega_1)R\varphi_0}{h + \delta}. \quad (4)$$

Максимальные сжимающие и сдвиговые усилия, расположенные в сечении  $O_1O_2$  будет рассчитываться по формулам:

$$\sigma_{\max} = \left(1 - \frac{\delta}{R}\right) E, \quad (5)$$

$$\tau_{\max} = \frac{G(1 - \omega_2 / \omega_1)R\varphi_0}{\delta}. \quad (6)$$

Зафиксировав для простоты вычислений в (2) среднюю базу для сдвиговых деформаций, т. е. полагая что в знаменателе стоит выражение  $\frac{h + \delta}{2}$ , получим следующие интегральные оценки для малых значений угла  $\varphi_0 \ll 1$ :

$$\sigma_{cp}^{(1)} = \frac{2ER}{h\varphi_0} (\sin \varphi_0 - \varphi_0 \cos \varphi_0) = \frac{2}{3} \cdot \frac{ER\varphi_0^2}{h}, \quad (7)$$

$$\tau_{cp}^{(1)} = \tau_{cp}^{(2)} = \frac{2G(1 - \omega_2 / \omega_1)R\varphi_0}{h + \delta}. \quad (8)$$

Величина силы трения сцепления рассчитывается по формуле:

$$F_{cy} = \frac{2}{3} \mu ERl\varphi_0^2, \quad (9)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения,  $l$  – ширина заготовки.

В случае  $F_{cy} \leq \tau_{cp}lR\varphi_0$ , т. е.

$$\mu \leq \frac{3G(1 - \omega_2 / \omega_1)R}{E(h + \delta)}, \quad (10)$$

может происходить проскальзывания валков по заготовке. Максимальная потребляемая мощность установки в ватах:

$$N = F_{cy}(\omega_1 + \omega_2)R = \frac{2}{3} \mu ER^2l\varphi_0^2(\omega_1 + \omega_2).$$

В качестве характеристики разрушения материала, на основании принципа осреднения [3] введем величину

$$K_c = \frac{h_1 K_c^{(1)} + h_2 K_c^{(2)}}{h_1 + h_2},$$

где  $K_c^{(i)}$  ( $i=1,2$ ) – сопротивление  $i$ -го слоя разрушению.

Полученные выше формулы позволяют дать приближенную оценку основным силовым параметрам, необходимым для разрушения материала. Более точная оценка характера разрушения может быть получена при наличии информации о полях напряжений, а также при учете микрповреждений, их дальнейших накоплений условий роста и так далее.

Итак, два вращающихся приводных валика, осуществляющих один из самых распространенных технологических процессов обработки металлов давлением прокатку [4, 5, 6], положены в основу схемы разрушающего устройства для осуществления процесса переработки материалов с целью их утилизации. Оба этих процесса (прокатка и утилизация), основаны на необратимости преобразований формоизменения исходных заготовок посредством пластической деформации, но решаемые ими задачи противоположны. Если в первом случае металлы и сплавы должны деформироваться без нарушения связи между кристаллами, т. е. без разрушения деформируемого тела, то во втором случае требуется как можно сильнее разрыхлить материал, разрушить его структуру. Существенное отличие физико-механических свойств подлежащих прокатке металлов и сплавов от свойств таких сложных композитов подлежащих утилизации, которыми являются, например шины, также откладывает отпечаток на характер сопротивления материалов пластическому деформированию в очаге деформации между валиками. Кроме того следует учитывать и тот факт, что теория продольной практики детально разработана лишь для случая вращения валиков с одинаковыми угловыми скоростями [4, 5, 6], тогда как при переработке материалов величина рассогласования скоростей является одним из наиболее важных управляемых параметров. Все вышеизложенное позволяет утверждать, что, несмотря на то, что многие научные положения и гипотезы, используемые в теории продольной прокатки, являются бесспорными и для

случая разрушения материалов, но все-таки воспользоваться ими следует весьма осмотрительно.

Приведем ниже вывод формулы для определения контактных напряжений при переработке материалов методом рассогласованной прокатки. При этом будем предполагать однородность процесса пластического деформирования, как в зоне отставания, так и в зоне опережения, а также то, что имеет место прилипание материала к валкам по некоторой части дуги касания.

Изобразим на рисунке 2 действующие на элемент полосы внутренние  $\sigma_x$  и внешние  $P, \tau$  силы.

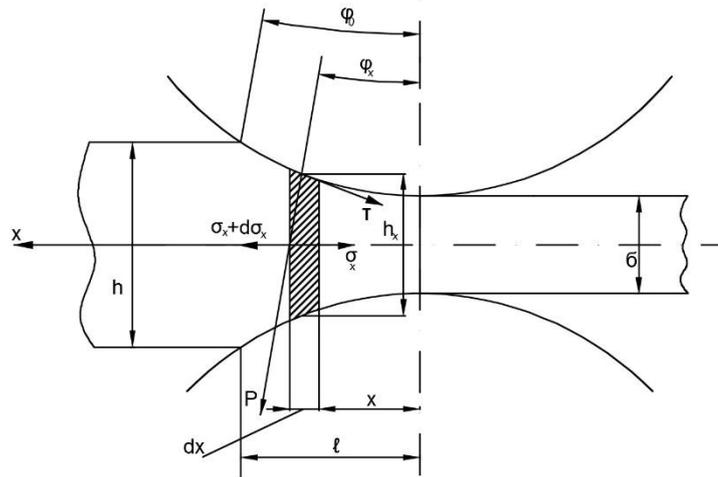


Рис. 2. Схема очага усилий разрушающего устройства

Уравнения равновесия в проекции на ось  $x$  примут

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x) - \sigma_x h_x + 2P_x \sin \varphi_x dx - 2\tau_x dx = 0. \quad (11)$$

Условие пластичности в нашем случае принимает вид:

$$-P_x - \sigma_x = 2\tau_s. \quad (12)$$

где  $\tau_s$  – сопротивление чистому сдвигу.

Знак «минус» в проекции сил в выражении (12) на ось  $Ox$ , согласуется с выбранным на рисунке 1 направлением этой оси.

Подставляем это значение в (11), получим основное дифференциальное уравнение для определения контактного нормального напряжения:

$$dP_x = -\left(2\tau_s + \frac{\tau_x}{\operatorname{tg} \varphi_x}\right) \frac{dh_x}{h_x}. \quad (13)$$

Выше, при выводе основного дифференциального уравнения рассогласованной прокатки, было учтено, как и в [4, 5], что  $\tau_s = \operatorname{const}$ , т. е.

$$d\sigma_x = d(-P_x - 2\tau_s) = -dP_x.$$

Заметим, что в случае вращения валков с разными скоростями предполагается их взаимное проскальзывание вдоль материала, в отличие от [4, 5], где принято  $\tau_x \equiv 0$ .

В нашем случае будем предполагать, что  $\tau_x \neq 0$  и изменяется по линейному закону от нулевого значения при входе в валки до некоторого максимального значения, которое в соответствии с формулой (6) закон изменения  $\tau_x$  имеет вид:

$$\tau_x = \frac{h - h_x}{\alpha}, \quad (14)$$

где  $\alpha^{-1} = G(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}) \frac{R\varphi_0}{\delta(h - \delta)}$ .

Так как радиус валков значительно превышает высоту разрушаемой заготовки, то с большой степенью точности можно положить  $\varphi_x = \varphi_0 / 2$ .

После подстановки (14) в (13), получим:

$$dP_x = -(2\tau_s - \frac{h}{\alpha \operatorname{tg} \varphi_0 / 2} + \frac{h_x}{\alpha \operatorname{tg} \varphi_0 / 2}) \frac{dh_x}{h_x}.$$

Проинтегрировав данное выражение, найдем  $P_x$ :

$$P_x = -(2\tau_s - \frac{h}{\alpha \operatorname{tg} \varphi_0 / 2}) \ln h_x - \frac{h_x}{\alpha \operatorname{tg} \varphi_0 / 2} + C.$$

Используем начальные условия  $P_x = 0$  при  $h_x = h$ , определяем  $C = (2\tau_s - \frac{h}{\alpha \operatorname{tg} \varphi_0 / 2}) \ln h + \frac{h}{\alpha \operatorname{tg} \varphi_0 / 2}$ , после чего выражение  $P_x$  принимает окончательный вид:

$$P_x = (2\tau_s - \frac{h}{\alpha \operatorname{tg} \varphi_0 / 2}) \ln \frac{h}{h_x} + \frac{h - h_x}{\alpha \operatorname{tg} \varphi_0 / 2}. \quad (15)$$

В местах проскальзывания валков по заготовке, следует брать зависимость  $\tau_x = \mu P_x$ , где  $\mu$  – коэффициент сухого трения скольжения, а  $P_x$  получается как частный случай формулы (15), если в ней положить  $\omega_2 = \omega_1$ .

В результате получим:

$$P_x = 2\tau_s \ln \frac{h}{h_x}. \quad (16)$$

Можно непосредственно убедиться в том, что соотношение совпадает с общеизвестным [4] и тем самым свидетельствует правомочности выбранной концепции.

Следует помнить, что величина рассогласования скоростей является одним из важнейших управляемых параметров, посредством выбора значений которых можно достичь наиболее оптимальные условия переработки материалов. Кроме того полученное новое соотношение (15) и известное (16) позволяют определить мощностные и энергетические затраты, необходимые для разрушения материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. Теория продольной прокатки.: Металлургия , 1980. – 320 с.
2. Теория прокатки. Справочник. Целиков А. И., Томленов А. Д., Зюзин В. И., Третьяков А. В., Никитин Г. С. – М.: Металлургия, 1982, – 335 с.
3. Старченко Д. И. Кинематика прокатки. – Киев: УМК ВО , 1992 – 276 с.
4. Григолюк Э. И., Куликов Г. М. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин. – М.: Машиностроение, 1988–288 с.
5. Композиционные материалы: справочник / Василевич В. В., Протасов В. Д., Болотин В. В. и др./ – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
6. Черепанов Г. П. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1988 – 296 с.

Поступила: 06.02.2022