

УДК 621.967.1

Петров П. А.  
Стриченко С. М.  
Бойко И. И.  
Сытник А. А.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ КРУГЛЫХ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ \*

В настоящее время особую актуальность приобретают вопросы экономии материальных и энергетических ресурсов, решение которых в области разделительных операций, неразрывно связано с уточнением и развитием соответствующих методов расчета на основе углубления и расширения представлений о процессе поперечной резки сортового металлопроката [1, 2].

Процесс разделения сортового металлопроката на мерные длины сопряжен с определенными сложностями, определяемых геометрией поперечных сечений разрезаемых заготовок и конструкцией используемого режущего инструмента. При этом, в самом общем случае, процесс поперечной резки включает в себя три стадии, а именно: вмятие ножей в металл, сдвиг или собственно рез, отрыв или скол, а максимальное значение силы резки для простых, то есть, прямоугольных или квадратных профилей определяют по известным инженерным зависимостям, представленным в работах [3, 4] и других. Одновременно с этим в данных работах рекомендовано, что при определении максимального значения силы резки в случае наличия более сложных, например, круглых профилей могут быть использованы результаты расчетов процесса резки параллельными ножами заготовок с простым поперечным сечением эквивалентным по площади.

В работах [1, 2] были выполнены исследования процесса разделения сортовых профилей квадратного сечения, при этом полученные результаты указали на необходимость более строгого учета реальной геометрии и кинематики развития очага деформации, что делает актуальным дальнейшее повышение степени научной обоснованности принимаемых в каждом конкретном случае проектно-конструкторских и технологических решений.

Целью работы является развитие методов расчета энергосиловых параметров процессов горячей и холодной поперечной резки заготовок круглого сечения параллельными и фасонными ножами.

По аналогии с методикой работы [5] в основу полученной математической модели процесса поперечной резки параллельными и фасонными ножами было положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы условия статического равновесия, рассматриваемого в рамках каждого отдельно выделенного элементарного объема очага деформации.

Аналитические зависимости силы резки, по отношению к простым формам поперечного сечения, можно получить в результате разбиения очага резки на конечное множество выделенных элементарных объемов площадью  $ds$  с последующим интегрированием.

В частности, силу резки в общем виде принято определять с использованием интеграла вида [3]:

$$P(\varepsilon) = \int_s \tau_\varepsilon ds, \quad (1)$$

где  $\tau_\varepsilon$  – сопротивление срезу при относительной глубине внедрения ножей  $\varepsilon$ , определяемое материалом разрезаемой заготовки и ее температурой [3–6];

\* Работа выполнена под руководством канд. техн. наук, доц. Боровика П. В.



$$x_H(\varepsilon_y) = \begin{cases} x_H^I = 0 & \text{при } \varepsilon_y \leq \varepsilon_H \\ x_H^{II} = \sqrt{D^2 - ((D-y)/(1-\varepsilon_H))^2} / 2 & \text{при } \varepsilon_y > \varepsilon_H. \end{cases} \quad (4)$$

Относительное внедрение ножей на удалении  $x$  равно  $\varepsilon_x = (h_x - h_{\varepsilon_x})/h_x$ . Таким образом, после несложных преобразований выражение (3) можно привести к виду:

$$P(\varepsilon_y) = 2D\tau_{\max} \int_{x_H(\varepsilon_y)}^{x_K} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_H}\right)^{\alpha_\tau} (1 - \varepsilon_y) dx. \quad (5)$$

Сила  $P$  может быть представлена как функция суммарного смещения ножей  $y$ :

$$P(y) = 2\tau_{\max} \frac{(D-y)}{\varepsilon_H^{\alpha_\tau}} \int_{x_H(\varepsilon_y)}^{x_K} \left(1 - \frac{D-y}{\sqrt{D^2 - 4x^2}}\right)^{\alpha_\tau} dx. \quad (6)$$

Интегрирование выражения (6) в аналитическом виде представляется весьма громоздким, поэтому предпочтительным является использование численного решения.

Для вычисления силы резки фасонными угловыми ножами круглой по сечению заготовки следует рассмотреть расчетную схему на рис. 2.

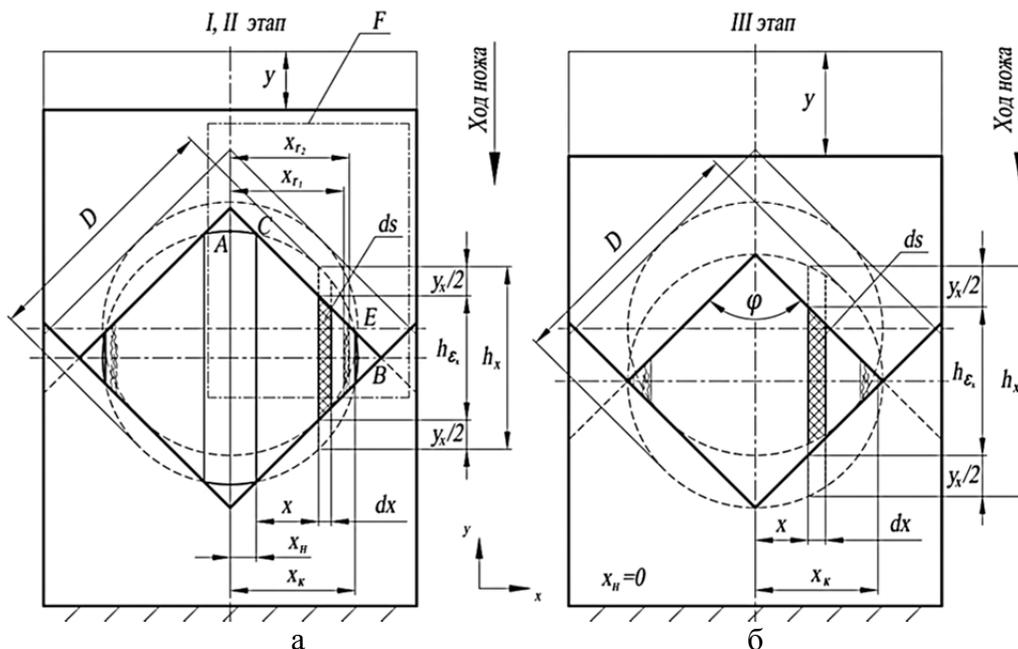


Рис. 2. Расчетная схема к определению силы резки круглой заготовки фасонными ножами

В данных условиях реализацию процесса разделения можно представить в виде трех этапов:

– рост поверхности контакта (отрезок  $CE$  на рис. 2, а) до момента исчерпания несущей способности в одной из точек сечения, располагаемой на расстоянии  $x_{кр}$  от оси заготовки при соответствующем смещении ножей на  $y_{кр}$ , т. е.  $\varepsilon_x(x_{кр}) = \varepsilon_H$ ;

– нож смещается до положения  $AB$  (см. рис. 2, а), когда образующая ножа соединяет точки расположенные на осях, при этом трещина растет в две противоположные стороны от координаты  $x_{кр}$ , а  $x_{r1}$  и  $x_{r2}$  соответствуют координатам начала и конца трещины, в случае же достижения образующей ножа положения  $AB$  имеем  $x_{r2} = x_K$ ;

– нож продолжает движение при этом форма образуемая ножами представляет собой квадрат на «угол» (см. рис. 2, б), но сечение ослаблено разрушенными участками, а координата  $x$  сплошной части разрезаемого сечения находится в пределах  $0 \leq x \leq x_{r1}$ .

Сила резки  $P_i(\varepsilon_y)$  при суммарном относительном смещении ножей  $\varepsilon_y = y/\sqrt{2D}$  и ее распределение  $P_i(y)$  в зависимости от суммарного смещения ножей  $y$ , учитывая то, что площадь выделенного элементарного объема высотой  $h_{\varepsilon_x} = \sqrt{D^2 - 4x^2} - (\sqrt{2D} - 2x - y)$  на удалении  $x$  определяется как  $ds = h_{\varepsilon_x} dx$ , для первого этапа внедрения ножа может быть вычислена с использованием интеграла вида:

$$P_I(y) = 2\tau_{\max} \left( \frac{1}{\varepsilon_H} \right)^{\alpha_\tau} \int_{x_H}^{x_K} \left[ 1 - \frac{(\sqrt{2D} - 2x - y)}{\sqrt{D^2 - 4x^2}} \right]^{\alpha_\tau} \left[ \sqrt{D^2 - 4x^2} - (\sqrt{2D} - 2x - y) \right] dx, \quad (7)$$

где пределы интегрирования соответствуют:

$$x_H = \frac{1}{4} \left( \sqrt{2D} - y - \sqrt{2\sqrt{2D}y - y^2} \right), \quad x_K = \frac{1}{4} \left( \sqrt{2D} - y + \sqrt{2\sqrt{2D}y - y^2} \right). \quad (8)$$

Аналогично для второго этапа внедрения ножей:

$$P_{II}(y) = 2\tau_{\max} \left( \frac{1}{\varepsilon_H} \right)^{\alpha_\tau} \int_{x_H}^{x_{r1}} \left[ 1 - \frac{(\sqrt{2D} - 2x - y)}{\sqrt{D^2 - 4x^2}} \right]^{\alpha_\tau} \left[ \sqrt{D^2 - 4x^2} - (\sqrt{2D} - 2x - y) \right] dx + \\ + 2\tau_{\max} \left( \frac{1}{\varepsilon_H} \right)^{\alpha_\tau} \int_{x_{r2}}^{x_K} \left[ 1 - \frac{(\sqrt{2D} - 2x - y)}{\sqrt{D^2 - 4x^2}} \right]^{\alpha_\tau} \left[ \sqrt{D^2 - 4x^2} - (\sqrt{2D} - 2x - y) \right] dx, \quad (9)$$

где пределы интегрирования  $x_H = 0$ ,  $x_K = \frac{1}{4} \left( \sqrt{2D} - y + \sqrt{2\sqrt{2D}y - y^2} \right)$ , а  $x_{r1}$  и  $x_{r2}$ :

$$x_{r1,2} = \frac{(1 - \varepsilon_H)}{2} \left( \frac{\sqrt{2D} - y}{(1 - \varepsilon_H)} \mp \frac{\left( \sqrt{(\varepsilon_H - 2)D^2 \varepsilon_H + (2\sqrt{2D} - y)y} \right) \pm (\sqrt{2D} - y)}{\varepsilon_H^2 - 2\varepsilon_H + 2} \right). \quad (10)$$

И, наконец, для третьего этапа внедрения ножей:

$$P_{III}(y) = 2\tau_{\max} \left( \frac{1}{\varepsilon_H} \right)^{\alpha_\tau} \int_{x_H}^{x_{r1}} \left[ 1 - \frac{(\sqrt{2D} - 2x - y)}{\sqrt{D^2 - 4x^2}} \right]^{\alpha_\tau} \left[ \sqrt{D^2 - 4x^2} - (\sqrt{2D} - 2x - y) \right] dx, \quad (11)$$

где  $x_H = 0$ , а  $x_{r1}$  определяется в соответствии с зависимостью (10).

Сила резки, при условии, что рабочий ход ножа до полного разделения заготовки составляет  $z_{paб}$ , в зависимости от относительного смещения ножей  $\varepsilon_y$  определяется набором уравнений:

$$P(\varepsilon_y) = \begin{cases} P_I(\varepsilon_y) & \text{при } 0 \leq y \leq y_{кр}; \\ P_{II}(\varepsilon_y) & \text{при } y_{кр} < y \leq (\sqrt{2} - 1)D; \\ P_{III}(\varepsilon_y) & \text{при } (\sqrt{2} - 1)D < y \leq z_{paб}. \end{cases} \quad (12)$$

Как и в случае резки заготовок с круглым поперечным сечением параллельными ножами (6), решение интеграла (12) целесообразно осуществлять численно, что было реализовано в среде MathCad, при этом расчетные распределения сопоставляли с экспериментальными, полученными в рамках лабораторных исследований на ножницах поперечной резки Н-20 кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии. В ходе данных экспериментальных исследований использовали свинцовые образцы круглого поперечного сечения диаметром 11,6 мм, которые подвергали поперечной резке двумя способами: в первом случае рез производился параллельными, а во втором – фасонными угловыми ножами (рис. 3).

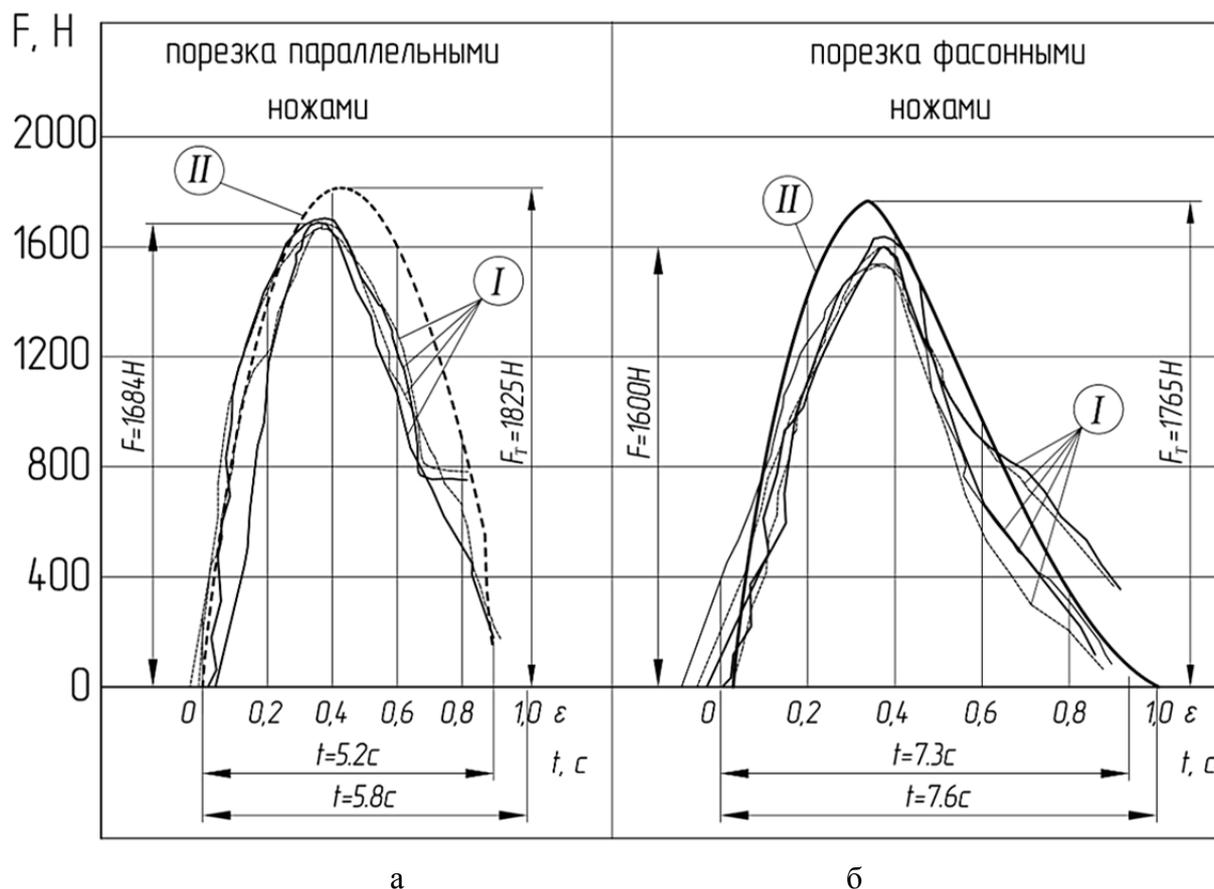


Рис. 3. Эмпирические I и расчетные согласно предложенным методикам II распределения силы резки параллельными (а) и фасонными (б) ножами свинцовых заготовок круглого поперечного сечения диаметром 11,6 мм

Анализ полученных результатов показал, что в случае поперечной резки круглой заготовки параллельными ножами максимальное экспериментальное значение силы составило –  $F = 1684 \text{ H}$ , а теоретическое, определяемое в соответствии с решением (6) –  $F_T = 1825 \text{ H}$  (расхождение между  $F$  и  $F_T$  соответствовало 8,37 %). В случае поперечной резки фасонными ножами максимальное экспериментальное значение силы реза составило –  $F = 1600 \text{ H}$ , а теоретическое определяемое по зависимости (12) –  $F_T = 1765 \text{ H}$  (расхождение между  $F$  и  $F_T$  соответствовало 7,81 %).

С целью сопоставительного анализа полученных результатов с традиционными представлениями о разделении сортовых профилей различной формы [3, 4] было проведено исследование величин максимальной силы при резке параллельными ножами равных по площади сечений (квадрат  $10,2 \times 10,2 \text{ мм}$  и круг  $\varnothing 11,6 \text{ мм}$ ). В результате было установлено следующее:

– в случае использования параллельных ножей максимальное значение экспериментальной силы резки для квадрата  $10,2 \times 10,2$  мм составило –  $F = 2079$  Н, для круга  $\varnothing 11,6$  мм –  $F = 1684$  Н, расхождение между указанными значениями соответствовало  $\approx 20$  %;

– максимальное значение силы резки квадрата  $10,2 \times 10,2$  мм по методике работ [3, 4], соответствовало  $F_K = 1859 \dots 2137$  Н, а круга  $\varnothing 11,6$  мм, определяемое по формуле (6) –  $F = 1825$  Н, расхождение между указанными значениями соответствовало до 14,6 %.

Отмеченное подтверждает целесообразность максимально строгого учета реальных геометрических и кинематических параметров процесса поперечной резки заготовок со сложной формой поперечного сечения, осуществляемого на основе рассмотренных численных подходов.

## ВЫВОДЫ

На основе численных подходов получила развитие методика расчета энергосиловых параметров процесса разделения длинномерных круглых сортовых заготовок на ножницах поперечной резки, оснащенных параллельными и фасонными ножами. Степень уточнения предоставляемых результатов, обусловленная более корректным учетом реального характера изменения во времени геометрических и кинематических параметров очага деформации составила 15–20 %. Результаты теоретического исследования подтверждены экспериментально, что объясняется максимально полным учетом всего комплекса исходных предпосылок и граничных условий, имеющих место при реализации процессов разделения сложнопрофильного металлопроката.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численная методика расчета энергосиловых параметров процесса горячей поперечной резки непрерывнолитых сортовых заготовок / А. В. Сатонин, С. М. Стриченко, А. В. Завгородний, А. А. Житлова // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 43–47.
2. Исследование энергосиловых параметров процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / А. В. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета.* – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – Вып. 35. – С. 131–137.
3. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королев. – М. : *Металлургия*, 1985. – 375 с.
4. Машины и агрегаты металлургических заводов : учебник для вузов. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А. И. Целиков, В. М. Полухин, В. М. Гребеник [и др.]. – М. : *Металлургия*, 1988. – 680 с.
5. Боровик П. В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225 с.
6. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 243 с.

Петров П. А. – ст. преп. ДонГТУ;  
Стриченко С. М. – нач. лаб. ТУ ПАО «ЕМЗ»;  
Бойко И. И. – студент ДГМА;  
Сытник А. А. – студент ДГМА.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.  
ТУ ПАО «ЕМЗ» – Техническое управление ПАО «Енакиевский металлургический завод», г. Енакиево.  
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: pavelpetrov@list.ru; amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 12.01.2012 г.