

УДК 621.774.3

к.т.н. Ошовская Е. В.,  
Ковалева О. А.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ ТРУБЫ КЛИНОВЫМ НОЖОМ

*Приведен аналитический метод уточненного расчета силы поперечной резки трубы клиновым ножом, учитывающий установленную закономерность изменения площади сдвигаемого поперечного сечения полого профиля в зависимости от внедрения в его тело рабочей кромки режущего инструмента, а также геометрические параметры и прочность материала разделяемого на части трубного проката.*

**Ключевые слова:** труба, поперечное сечение, клиновой нож, сдвигаемый слой, сила резки.

Выполнение расчета энергосиловых параметров привода ножниц, предназначенных для поперечной резки труб, предполагает наличие точных методов определения действующих на него технологических нагрузок с учетом геометрических размеров и прочности материала разделяемого на части полого профиля [1].

В соответствии с классической формулой [2], сила поперечной резки любого прокатного изделия равна

$$P = K_1 K_2 K_3 \sigma_B F_{mp},$$

где  $K_1$  — коэффициент, учитывающий отношение допускаемого напряжения при срезе к пределу прочности материала трубы;

$K_2$  — коэффициент, учитывающий увеличение усилия реза при затуплении ножа;

$K_3$  — коэффициент, учитывающий увеличение усилия реза при наличии зазора между рабочими кромками ножей;

$\sigma_B$  — предел прочности материала разрезаемого проката, МПа;

$F_{mp}$  — суммарная площадь сдвигаемого слоя материала, мм<sup>2</sup>.

Точность расчетных данных при использовании указанной формулы в первую очередь зависит от корректности подставляемых в нее значений площади сдвигаемого слоя материала прокатного изделия, что требует учета закономерности изменения данного геометрического параметра во

время движения ножа относительно поперечного сечения разрезаемого профиля. В результате проводившихся за последние 10 лет исследований в данной области были предложены теоретические зависимости для расчета текущих значений площадей сдвигаемых слоев материала с учетом относительного перемещения ножа при поперечной резке на части проката, имеющего прямоугольную, квадратную или круглую формы поперечных сечений [3], а также более сложных сортовых профилей (уголок, швеллер, двутавр) [4, 5]. Следует отметить, что опубликованные ранее рекомендации не могут быть использованы для расчета параметров процесса резки труб, имеющего свою специфику в случае применения ножей с фигурной режущей кромкой [6, 7].

Целью настоящей работы было получение аналитическим методом информации, необходимой для вывода зависимости, позволяющей с учетом геометрических параметров трубы и прочности ее материала рассчитать силу, которая требуется при разделении на части полого профиля круглой формы.

Для определения площади поперечного сечения трубы, подвергаемого сдвигу в процессе ее поперечной резки, использовали расчетную схему, показанную на рисунке 1. В соответствии с ней, сечение трубы и ножа располагается в плоскости  $XOY$ , а центр сечения трубы совпадает

с началом координат — т.  $O$ . Ход ножа  $h_n$  определяет его текущее положение.

Внешнюю радиусом  $R$  и внутреннюю радиусом  $r$  окружности, формирующие поперечное сечение трубы, и линию кромки ножа можно представить в виде функциональных зависимостей:

– внешняя окружность:

$$y = \pm\sqrt{R^2 - x^2} = f_1(x); \quad (1)$$

– внутренняя окружность:

$$y = \pm\sqrt{r^2 - x^2} = f_2(x); \quad (2)$$

– кромка ножа:

$$y = a + x = f_3(x), \quad (3)$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от хода ножа,  $a = R - h_n$ .

Площадь сечения, подверженного сдвигу,  $F_{mpi}$  в момент времени  $t_i$ , представляет собой разницу площадей сечений  $F$ , пройденных ножом на моменты времени  $t_i$  и  $t_{i-1}$ :

$$F_{mpi} = F_i - F_{i-1}. \quad (4)$$

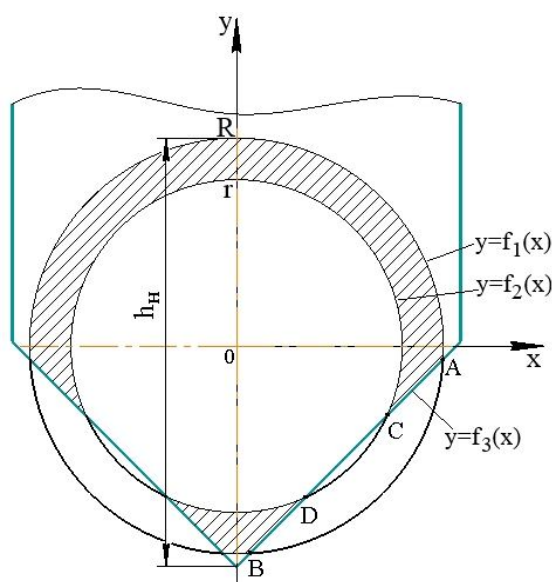


Рисунок 1 Обобщающая расчетная схема к определению площади поперечного сечения трубы, подверженного сдвигу

Так как рассматриваемые объекты (труба и нож) имеют плоскость симметрии, совпадающую с плоскостью  $YOZ$ , то для вывода расчётных зависимостей рассмотрена часть, расположенная в положительном направлении оси  $X$ .

Вычисление значения текущей площади  $F_i$  основано на нахождении значений определенных интегралов от функций (1–3). Пределами интегрирования выступают абсциссы точек пересечения линии кромки ножа с внешней и внутренней окружностями, формирующих поперечное сечение трубы. В разных положениях ножа количество точек пересечения различно — от 1 до 4.

В общем случае точки пересечения окружности радиусом  $\rho$  и прямой определяются из системы

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = \rho^2; \\ y = a + x, \end{cases} \quad (5)$$

которая после подстановки второго выражения в первое преобразуется в квадратное уравнение

$$2x^2 + 2ax + (a^2 - \rho^2) = 0. \quad (6)$$

Дискриминант уравнения (6):

$$D = 4a^2 - 8(a^2 - \rho^2) = 4(2\rho^2 - a^2).$$

Корни уравнения, соответствующие абсциссам точек пересечения окружности и прямой, вычисляются по выражению

$$x_{кор1,2} = \frac{-a \pm \sqrt{2\rho^2 - a^2}}{2}. \quad (7)$$

В выражениях (7)

$$\rho = \begin{cases} r & \text{— для внутренней окружности;} \\ R & \text{— для внешней окружности.} \end{cases} \quad (8)$$

Площадь фигуры, ограниченной линией ножа на интервале  $[x_n, x_k]$ , может быть найдена как определенный интеграл функции (3):

$$F_{\text{нжс}} = \int_{x_n}^{x_k} f_3(x) dx = \int_{x_n}^{x_k} (a+x) dx = \quad (9)$$

$$= a(x_k - x_n) + \frac{1}{2}(x_k^2 - x_n^2).$$

Площадь фигуры, ограниченной участком окружности на интервале  $[x_n, x_k]$ , может быть найдена как определенный интеграл функции  $y = \sqrt{\rho^2 - x^2}$ :

$$F_{\text{окр}} = \int_{x_n}^{x_k} f(x) dx = \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{\rho^2 - x^2} dx = \quad (10)$$

$$= \frac{\rho^2}{2} \left( (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{\sin 2\varphi_2 - \sin 2\varphi_1}{2} \right),$$

где

$$\varphi_1 = \arcsin(x_n/\rho); \quad \varphi_2 = \arcsin(x_k/\rho). \quad (11)$$

В выражениях (10) и (11) параметр  $\rho$  соответствует (8).

Рассмотрение положения ножа в разные моменты процесса резки позволило выделить несколько расчетных вариантов для вычисления площадей сечений  $F$ , пройденных ножом (рис. 2).

Вариант 1 (рис. 2, а).

Ход ножа  $h_n = 0 \dots \delta$ , где  $\delta$  — толщина стенки трубы  $\delta = R - r$ .

Площадь пройденного сечения соответствует разнице площадей фигуры, ограниченной дугой внешней окружности, и фигуры, ограниченной линией кромки ножа:

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{нжс}} = \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_0^{x_{p11}} f_3(x) dx. \quad (12)$$

Вариант 2 (рис. 2, б).

Ход ножа  $h_n = \delta \dots (R+r)$ .

Площадь пройденного сечения соответствует разнице площадей фигуры, ограниченной дугой внешней окружности, и фигуры, ограниченной линией кромки ножа, и фигуры, ограниченной дугой внутренней окружности:

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{окр2}} - F_{\text{нжс}} =$$

$$= \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_0^{x_{p21}} f_2(x) dx - \int_{x_{p21}}^{x_{p11}} f_3(x) dx. \quad (13)$$

При движении ножа после отметки  $h_n = R+r$  расчетные схемы имеют отличия в зависимости от соотношения  $R$  и  $r\sqrt{2}$ . Рассмотрим схемы при  $R > r\sqrt{2}$ .

Вариант 3 (рис. 2, в).

Ход ножа  $h_n = (R+r) \dots (R+r\sqrt{2})$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{нжс}} - F_{\text{окр2}} =$$

$$= \left[ \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_0^r f_2(x) dx - \int_{-a}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right] +$$

$$+ \left[ \int_{x_{p21}}^{-a} f_3(x) dx - \int_{x_{p21}}^r f_2(x) dx \right] + \quad (14)$$

$$+ \left[ \int_0^{x_{p22}} f_3(x) dx - \int_0^{x_{p22}} f_2(x) dx \right].$$

Вариант 4 (рис. 2, г).

Ход ножа  $h_n = (R+r\sqrt{2}) \dots 2R$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{нжс}} - \frac{\pi r^2}{2} =$$

$$= \left[ \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_{-a}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right] + \quad (15)$$

$$+ \left[ \int_0^{-a} f_3(x) dx - \frac{\pi r^2}{2} \right].$$

Вариант 5 (рис. 2, д).

Ход ножа  $h_n = 2R \dots R(1+r\sqrt{2})$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{нжс}} - \frac{\pi r^2}{2} =$$

$$= \frac{\pi R^2}{4} + \int_0^{x_{p12}} f_1(x) dx + \quad (16)$$

$$+ \int_{x_{p11}}^R f_1(x) dx + \left[ \int_{x_{p12}}^{x_{p11}} f_3(x) dx - \frac{\pi r^2}{2} \right].$$

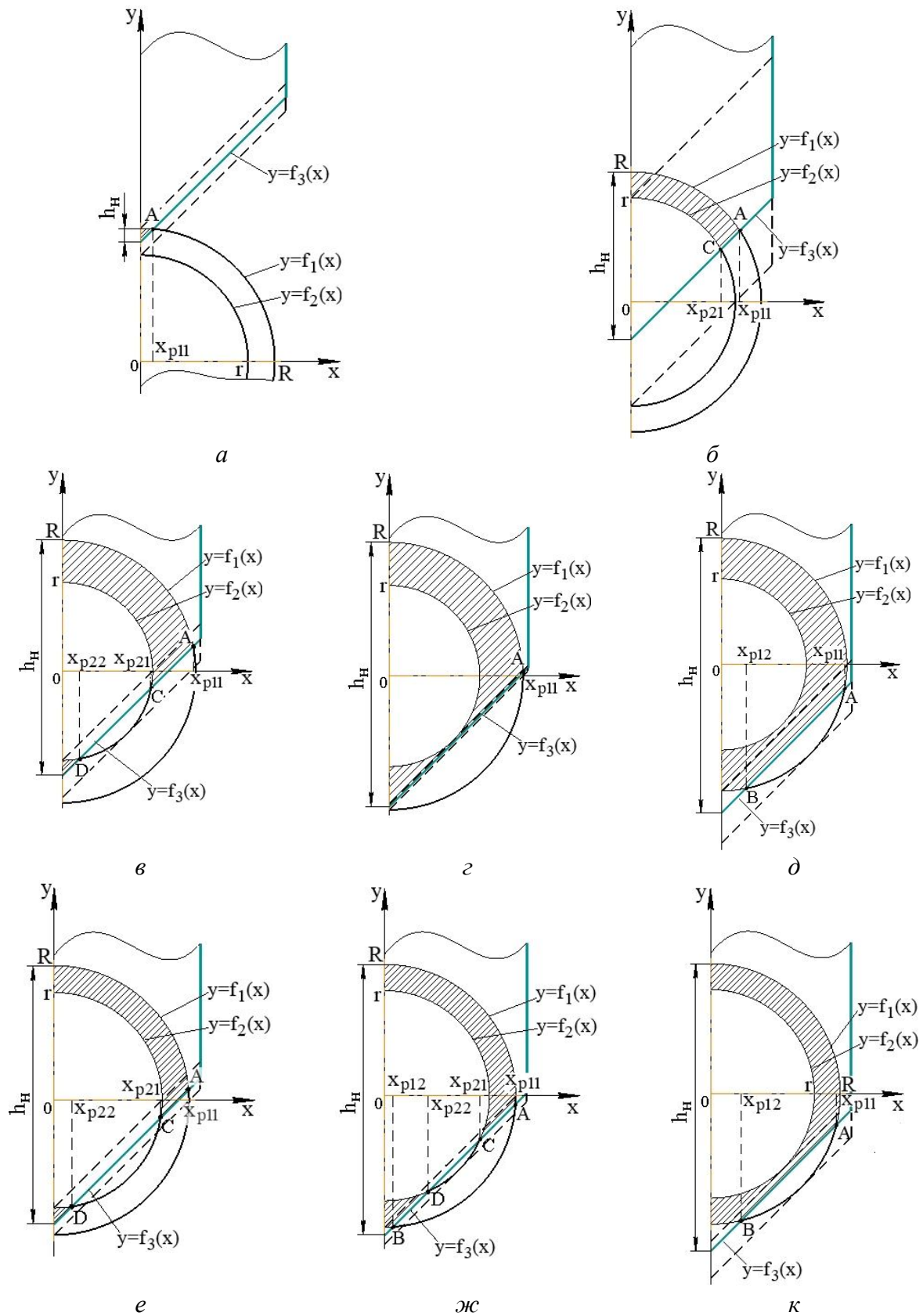


Рисунок 2 Расчетные схемы при определении площади сечения, срезаемого ножом

Рассмотрим схемы при  $R \leq r\sqrt{2}$ .

Вариант 6 (рис. 2, е).

Ход ножа  $h_n = (R + r) \dots 2R$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{окр1} - F_{нжс} - F_{окр2} = \left[ \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_0^r f_2(x) dx - \int_{-a}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right] + \left[ \int_{x_{p21}}^{-a} f_3(x) dx - \int_{x_{p21}}^r f_2(x) dx \right] + \left[ \int_0^{x_{p21}} f_3(x) dx - \int_0^{x_{p21}} f_2(x) dx \right]. \quad (17)$$

Вариант 7 (рис. 2, ж).

Ход ножа  $h_n = 2R \dots (R + r\sqrt{2})$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{окр1} - F_{нжс} - F_{окр2} = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{4} + \left[ \int_0^{x_{p12}} f_1(x) dx + \left| \int_{x_{p12}}^{x_{p22}} f_3(x) dx \right| - \int_0^{x_{p22}} f_2(x) dx \right] + \left[ \int_{x_{p12}}^R f_1(x) dx + \left| \int_{x_{p21}}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right| - \int_{x_{p21}}^r f_2(x) dx \right]. \quad (18)$$

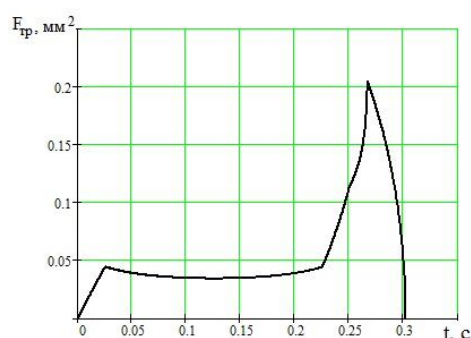
Вариант 8 (рис. 2, к).

Ход ножа  $h_n = (R + r\sqrt{2}) \dots R(1 + \sqrt{2})$ .

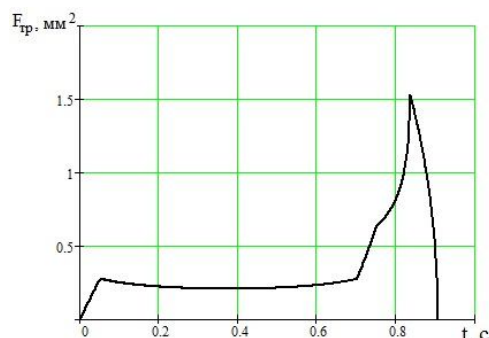
Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{окр1} - F_{нжс} - \frac{\pi r^2}{2} = \frac{\pi R^2}{4} + \int_0^{x_{p12}} f_1(x) dx + \int_{x_{p11}}^R f_1(x) dx + \left| \int_{x_{p21}}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right| - \frac{\pi r^2}{2}. \quad (19)$$

С использованием полученных аналитических зависимостей (1–19) в пакете MathCad составлена программа для расчета площади поперечного сечения трубы, подверженной сдвигу, в зависимости от хода ножа  $h_n$ . На рисунке 3 в качестве примера показаны графики изменения площади сдвигаемого поперечного сечения для двух типоразмеров труб, отличающихся наружным диаметром и толщиной стенки.



а



б

а) диаметр 10 мм, толщина стенки 1 мм; б) диаметр 30 мм, толщина стенки 2 мм

Рисунок 3 Графики изменения площади сдвигаемого поперечного сечения для труб различных геометрических размеров при скорости движения ножа 40 мм/с

Сила воздействия клинового ножа на трубу может быть представлена как функция трех факторов — диаметра трубы  $D_{тр}$ , толщины стенки трубы  $\delta$ , предела прочности ее материала  $\sigma_{мт}$ :

$$P = f(D_{тр}, \delta, \sigma_{мт}).$$

Для оценки степени влияния указанных факторов на функцию отклика и вывода эмпирической зависимости, позволяющей с меньшей трудоемкостью рассчитать максимальное значение силы реза  $P_{max}$  клиновым ножом, выполнили планированный математический эксперимент по плану первого порядка.

Уровни варьирования факторов при проведении эксперимента приведены в таблице 1. Общий вид зависимости представлен уравнением:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3.$$

На основании положений метода планирования эксперимента была составлена матрица (табл. 2), в соответствии с которой выполнены 11 математических опытов по определению максимального значения силы реза  $P_{max}$  с использованием разработанной программы для расчета площади срезаемого сечения.

Рассчитанные значения коэффициентов регрессии для уравнения в кодированном виде приведены в таблице 3, в которой также дана оценка их уровня значимости по критерию Стьюдента. Табличное значение критерия  $t_m = 4,3$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

Таблица 1

Факторы математического эксперимента

Наименование фактора	Обозначение в кодированном виде	Обозначение в натуральном виде	Единицы измерения	Уровни варьирования			Шаг варьирования
				-1	0	+1	
Наружный диаметр трубы	$x_1$	$D_{тр}$	мм	10	20	30	10
Толщина стенки трубы	$x_2$	$\delta$	мм	1	2	3	1
Предел прочности материала трубы	$x_3$	$\sigma_{мт}$	МПа	440	465	490	25

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	План-матрица				$P_{max}, Н$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	+1	-1	-1	-1	6950
2	+1	+1	-1	-1	33862
3	+1	-1	+1	-1	12290
4	+1	+1	+1	-1	62545
5	+1	-1	-1	+1	7740
6	+1	+1	-1	+1	37710
7	+1	-1	+1	+1	13687
8	+1	+1	+1	+1	69653
9		0	0	0	29377
10		0	0	0	28745
11		0	0	0	30009

Таблица 3

Коэффициенты уравнения регрессии и оценка их уровня значимости для плоского ножа

Коэффициент при факторах и их взаимодействиях	Обозначение коэффициента регрессии	Значение	Проверка значимости коэффициентов по условию $t_p > t_m^*$
–	$b_0$	30554,8	+
$x_1$	$b_1$	20387,8	+
$x_2$	$b_2$	8989,2	+
$x_3$	$b_3$	1642,7	+
$x_1x_2$	$b_{12}$	6167,4	+
$x_1x_3$	$b_{13}$	1096,1	+
$x_2x_3$	$b_{23}$	483,3	–

\*Знак «+» — коэффициент значимый, знак «–» — коэффициент незначимый.

На основании данных таблицы 3 можно отметить разную степень влияния принятых для эксперимента факторов на параметр — максимальное значение силы реза. Наиболее значимым фактором является диаметр трубы  $D_{mp}$ , степень влияния толщины стенки  $\delta$  в 2,3 раза меньше, а предела прочности материала  $\sigma_{mt}$  — в 12,4 раза.

Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 30554,8 + 20387,8x_1 + 8989,2x_2 + 1642,7x_3 + 6167,4x_1x_2 + 1096,1x_1x_3.$$

Выполнив перевод уравнения из кодированного вида в натуральный, получили зависимость для определения максимального значения силы реза клиновым ножом:

$$P_{\max} = 6691,1 - 1233,5D_{mp} - 3345,6\delta - 22\sigma_{mt} + 616,7D_{mp}\delta + 4,4D_{mp}\sigma_{mt}.$$

### Библиографический список

1. Расчет силы резания тонкостенных труб клиновидными ножами [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сб. научных трудов. — Донецк : ДонНТУ, 2003. — Вып. 24. — С. 61–66.
2. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката [Текст] / А. И. Целиков [и др.]. — М. : Металлургия, 1988. — 680 с.
3. Сатонин, А. В. Имитационное математическое моделирование спектра рабочей загрузки процесса поперечной резки сортовых профилей на ножницах [Текст] / А. В. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. — Краматорск : ДГМА, 2014. — № 2 (39). — С. 54–59.
4. Боровик, П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей [Текст] / П. В. Боровик, П. А. Петров // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2013. — № 5. — С. 41–44.

5. Ульяницкий, В. Н. Влияние формы и расположения профиля на энергосиловые параметры резки фасонного металлопроката сортовыми ножницами [Текст] / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ. — 2016. — Вып. 3. — С. 149–156.

6. Лыжников, Е. И. Технологические и силовые параметры резки труб плоским ножом [Текст] / Е. И. Лыжников, Е. К. Дунда // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. — 2013. — № 1. — С. 137–140.

7. Лыжников, Е. И. Особенности технологического процесса резки труб плоским ножом [Текст] / Е. И. Лыжников, Е. К. Давыденко // Обработка материалов давлением. — 2013. — № 2 (35). — С. 142–146.

8. Болтян, А. В. Теория инженерных исследований [Текст] : учебное пособие / А. В. Болтян, И. А. Горобец. — Севастополь : Вебер, 2001. — 139 с.

© Ошовская Е. В.

© Ковалева О. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А.,  
д.т.н., доц., зав. каф. УК ДонНТУ Ченцовым Н. А.*

**PhD in Engineering Oshovskaya E. V., Kovaleva O. A. (DonNTU, Donetsk, DPR)**

#### **ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE FORCE OF TRANSVERSAL PIPE CUTTING WITH A WEDGE-SHAPED BLADE**

*There has been given the analytical method for the refined calculation of the force of transversal pipe cutting with a wedge-shaped blade, that considers the determined regularity of area changing of the sheared cross-section of hollow profile depending on introduction the working edge of cutting tool into its body, as well as the geometric parameters and strength of material of rolled tubular products divided into parts.*

**Key words:** pipe, transversal cutting, wedge-shaped blade, shear layer, cutting force.