

УДК 621.774.3

*д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ткачѳв М. Ю.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
Ковалѳва О. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖНИЦ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ РЕЗКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

Представлены конструктивные особенности, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований параметров работы ножниц для качественной резки тонкостенных труб. Ножницы позволяют реализовать двухстадийный процесс разделения трубы на мерные длины, при котором исключается смятие её торцевых поверхностей.

Ключевые слова: тонкостенная труба, смятие торца, клиновой нож, сила реза, гидроцилиндр, электропривод, крутящий момент.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Заключительной технологической операцией производства проката, как известно, является его порезка на мерные длины. При этом используют различные способы разделения на части прокатной продукции с применением дисковых пил, абразивных кругов или ножниц. Выбор типа оборудования, с помощью которого осуществляют указанную операцию в потоке прокатного стана, зависит в первую очередь от формы поперечного сечения выпускаемой продукции. В частности, при производстве труб предпочтение отдают порезке пилами или абразивными кругами, что обусловлено стремлением получить требуемое качество торцевых частей разделяемого профиля, от которого зависит его товарный вид [1–3].

Следует отметить, что процесс резки фасонных профилей вращающимися с большой скоростью дисковыми элементами сопровождается значительным шумовым эффектом с одновременным выбросом большого количества искр и абразивных частиц, а это требует применения дополнительных мер по охране труда рабочего персонала. В связи с этим в последние годы проводились исследования, направленные на изучение возможности успешного применения ножниц для резки сложных прокатных профилей [4–6].

Постановка задачи. Целью данной работы является обоснование конструктивных и энергосиловых параметров ножниц, позволяющих при резке тонкостенных труб устранить деформацию их торцевой поверхности и тем самым улучшить товарный вид и исключить потери полых профилей, связанные с необходимостью удаления деформированных частей.

Изложение материала и его результаты. Как показали результаты модельных исследований процесса резки тонкостенных труб клиновыми ножами, проведѳнные ранее сотрудниками кафедры «Механическое оборудование заводов чѳрной металлургии им. профессора Седуша В. Я.» Донецкого национального технического университета, смятие торцевых поверхностей сварных и цельнотянутых труб можно исключить при двухстадийном их разделении на части. Для этого на трубе в месте реза предварительно выполняют лыску, ослабляющую поперечное сечение прокатного профиля, а затем клиновым ножом осуществляют его резку. Для наглядности на рисунке 1 приведены фотографии торцевых частей труб, разделѳнных на части по одной и двухстадийной схемам резки [7].

Реализация резки по второй схеме предполагает наличие ножниц, имеющих в своём составе два механизма, обеспечи-

вающих одновременное движение с разными скоростями в двух взаимно перпендикулярных плоскостях ножей, осуществляющих соответственно надрез на наружной поверхности трубы и последующее разделение её на части. При этом горизонтально перемещающийся нож должен выполнить лыску на трубе до момента контакта с нею острия вертикально опускающегося клинового ножа.

В результате выполненного поиска по литературным и патентным фондам уда-

лось выявить несколько конструктивных схем режущих систем, отличающихся способом реализации силового воздействия двух ножей на разрезаемую трубу и согласования порядка их относительного перемещения в процессе резки. Все отобранные для сопоставительного анализа кинематические схемы известных систем качественной резки трубного профиля можно разделить на две основные группы в зависимости от числа приводов, применяемых в них для сообщения движения двум ножам.

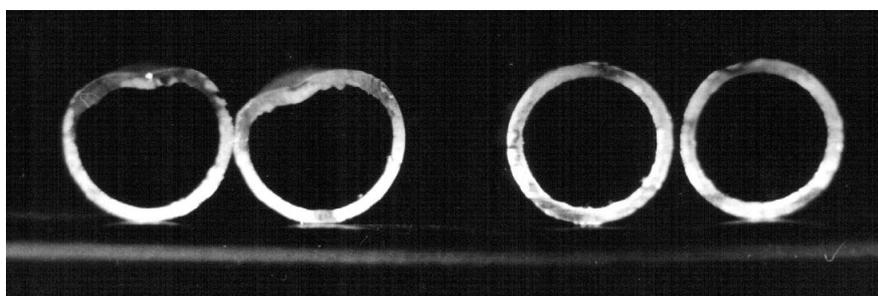


Рисунок 1 Вид торцевой части труб после разделения на части по одно- (а) и двухстадийной (б) схемам резки

К первой группе следует отнести ножницы с двумя гидравлическими цилиндрами, которые последовательно включают в работу с заданным временным интервалом по запускающей команде, поступающей от блока управления. Для согласованного действия обоих силовых цилиндров ножницы снабжены достаточно сложной системой регулирования, требующей настройки в случае необходимости перехода к порезке трубы другого диаметра.

Ножницы, отнесённые ко второй группе, имеют один силовой агрегат, приводящий в движение оба ножа по закону, задаваемому механической автоматикой благодаря применению в них специальных кинематических схем.

С учётом достоинств и недостатков выявленных аналогов авторами была предложена конструкция малогабаритных ножниц с комбинированным режущим блоком, схема которого представлена на рисунке 2. Требуемая последовательность взаимодей-

ствия элементов разработанной системы ножниц реализована за счёт обеспечения кинематической связи между ними посредством двух вертикальных и одной горизонтальной зубчатых реек, находящихся в зацеплении с размещёнными на одном валу зубчатыми колёсами с разными диаметрами делительных окружностей, соотносящимися между собой так, что скорость горизонтальной рейки превышает скорость движения вертикальных реек в 1,5 раза.

Указанный режущий блок может работать в комплектации с гидравлическим или электромеханическим приводами (рис. 3).

В первом варианте перемещение суппорта с клиновым ножом обеспечивает вертикально закреплённый на станине ножниц силовой гидроцилиндр, шток которого посредством шарнира соединён с подвижной частью режущего блока.

Ножницы с электромеханическим приводом дополнительно включают одноколесный вал с шатуном для сообщения суп-

порту с верхним клиновым ножом вертикального перемещения, тихоходную зубчатую передачу, двухступенчатый коническо-цилиндрический редуктор и электродвигатель. При этом колесо тихоходной зубчатой передачи является одной из щёк одноко-

ленного вала, что позволило обеспечить достаточную компактность привода.

Расчёт и конструирование предложенных малогабаритных ножниц предполагают наличие информации о технологической нагрузке, преодолеваемой их приводом.

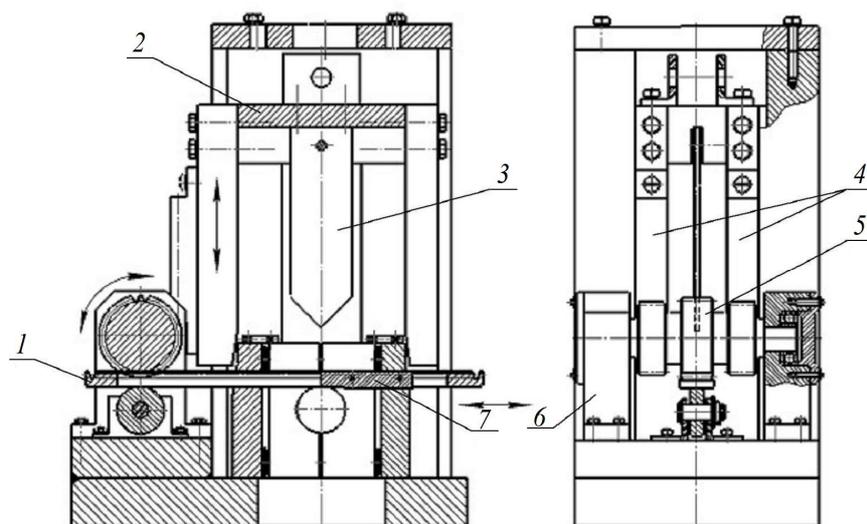


Рисунок 2 Кинематическая схема механической синхронизации движения горизонтального и вертикального ножей режущего блока ножниц:
 1 — горизонтальная зубчатая рейка; 2 — суппорт; 3 — вертикальный клиновидный нож;
 4 — вертикальные зубчатые рейки; 5 — вал с зубчатыми колёсами;
 6 — подшипниковая опора вала; 7 — горизонтальный нож

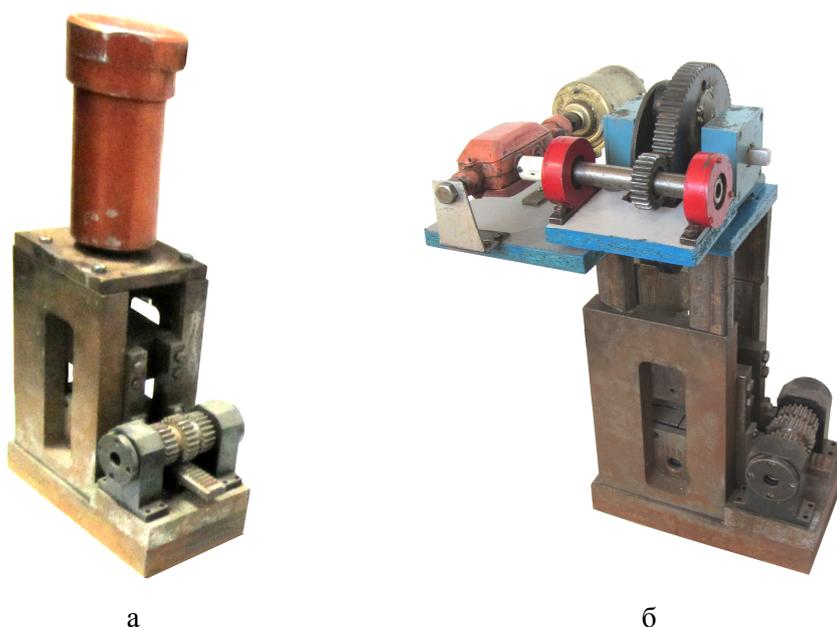


Рисунок 3 Конструктивное исполнение разработанных ножниц с гидравлическим (а) и электромеханическим (б) приводами

Значительную её часть наряду с силами сопротивления, действующими в узлах сочленения элементов механической системы, составляет сила, необходимая для разрушения целостности трубы [8].

В соответствии с методикой определения усилия резания наклонными ножами, описанной в работе [9], искомую силу можно рассчитать по формуле

$$P = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \sigma_B \cdot 2F_{рез}, \quad (1)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий отношение максимального сопротивления срезу к пределу прочности; k_2 — коэффициент, учитывающий увеличение усилия резания при затуплении ножей; k_3 — коэффициент, учитывающий увеличение усилия резания из-за наличия бокового зазора между ножами; σ_B — предел прочности материала разрезаемой трубы, МПа; $F_{рез}$ — площадь сечения трубы в момент начала сдвига металла, мм².

На основании практических данных следует принимать следующие значения приведенных коэффициентов: $k_1=0,6-0,7$; $k_2=1,15-1,25$; $k_3=1,2-1,3$.

При разделении трубы клиновидным ножом сопротивление резанию оказывает не вся площадь её поперечного сечения, а только часть, форма и размеры которой при одинаковом перемещении режущих кромок постоянно изменяются. В качестве примера на рисунке 4 показана схема разбиения площади поперечного сечения трубы с наружным диаметром D и внутренним диаметром d при дискретном перемещении клиновидного ножа с шагом Δ .

Для нахождения площадей сечения трубы, подверженных сдвигу при переходе вертикального режущего ножа из одного положения в следующее, использовали одну из функций САПР «КОМПАС», которая позволяет с высокой точностью получить нужную расчётную информацию для любых диаметров труб с различной толщиной стенок и заданной ширины ре-

жущего ножа. Поскольку сдвиг стенки трубы в зоне реза происходит одновременно по двум плоскостям контакта клиновидного ножа с нижними блоками профилированных ножей, то в формулу (1) подставляют удвоенное значение площади сечения трубы, подвергаемой сдвигу.

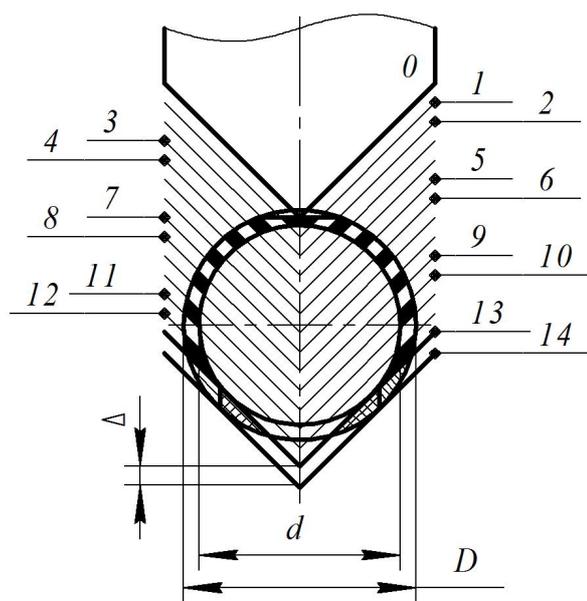


Рисунок 4 Расчётная схема для определения площади срезаемого элемента в поперечном сечении трубы при пошаговом перемещении клиновидного ножа

По полученным текущим значениям площади срезаемого сечения трубы с использованием приведённой выше зависимости рассчитывали соответствующие силовые нагрузки, преодолеваемые приводом ножниц в процессе разделения круглого профиля. На рисунке 5 приведены графики изменения силы резания труб диаметром 10, 20 и 30 мм с толщиной стенок 1, 2 и 3 мм в зависимости от вертикального перемещения клиновидного ножа, построенные по расчётным данным в соответствии со схемой, показанной на рисунке 4.

По максимальному значению силы P для трубы с наибольшим диаметром, которая может быть разрезана на проектируемых ножницах, определяют диаметр поршня силового гидроцилиндра $d_{ц}$ при выбранном из стандартного ряда значений

давления p_n , развиваемого насосом при водной маслостанции. Затем с учётом скорости движения штока цилиндра, равной скорости движения ножа, рассчитывают требуемый расход насоса станции Q .

В случае расчёта энергосиловых параметров электромеханического привода ножниц, используя взятые из графиков на рисунке 5 текущие значения силы P , передаваемой шатуном при фиксированных углах поворота одноколенного вала φ , и соответствующие им плечи, путём их перемножения получают зависимость изменения момента сопротивления, преодолеваемого приводом, в течение выполнения одного реза трубы. В качестве примера на рисунке 6 показан характерный вид графиков изменения указанных параметров.

Далее с использованием построенной нагрузочной диаграммы определяют значение эквивалентного момента по формуле

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}}.$$

Здесь M_i и t_i — момент и время для простых участков, на которые разбита нагрузочная диаграмма.

Тогда расчётную мощность привода ножниц вычисляют по формуле

$$N_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{экв}} \omega_{\text{кв}}}{\eta},$$

где $\omega_{\text{кв}}$ — угловая скорость поворота одноколенного вала; η — общий КПД механической системы.

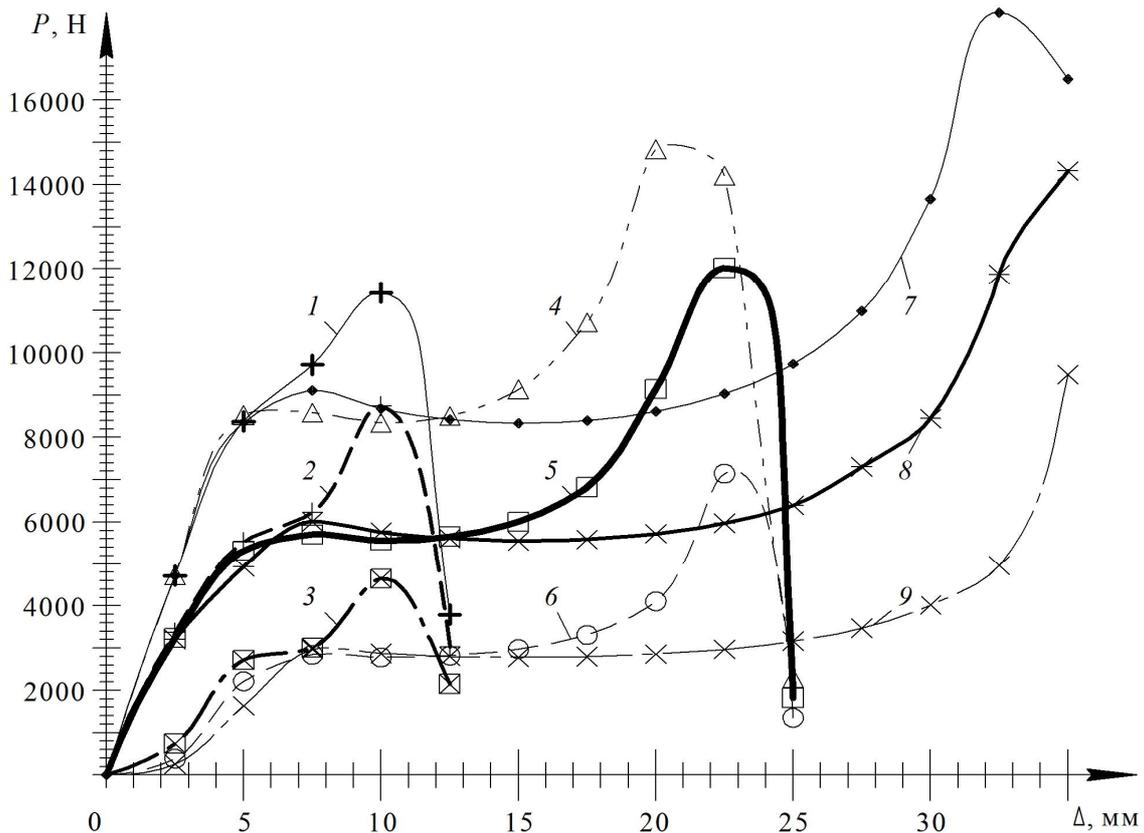


Рисунок 5 Графики зависимости $P = f(\Delta)$ для тонкостенных труб различного типоразмера:

- 1 — $D = 10$ мм, $d = 6$ мм; 2 — $D = 10$ мм, $d = 8$ мм; 3 — $D = 10$ мм, $d = 9$ мм;
 4 — $D = 20$ мм, $d = 14$ мм; 5 — $D = 20$ мм, $d = 16$ мм; 6 — $D = 20$ мм, $d = 18$ мм;
 7 — $D = 30$ мм, $d = 24$ мм; 8 — $D = 30$ мм, $d = 26$ мм; 9 — $D = 30$ мм, $d = 28$ мм

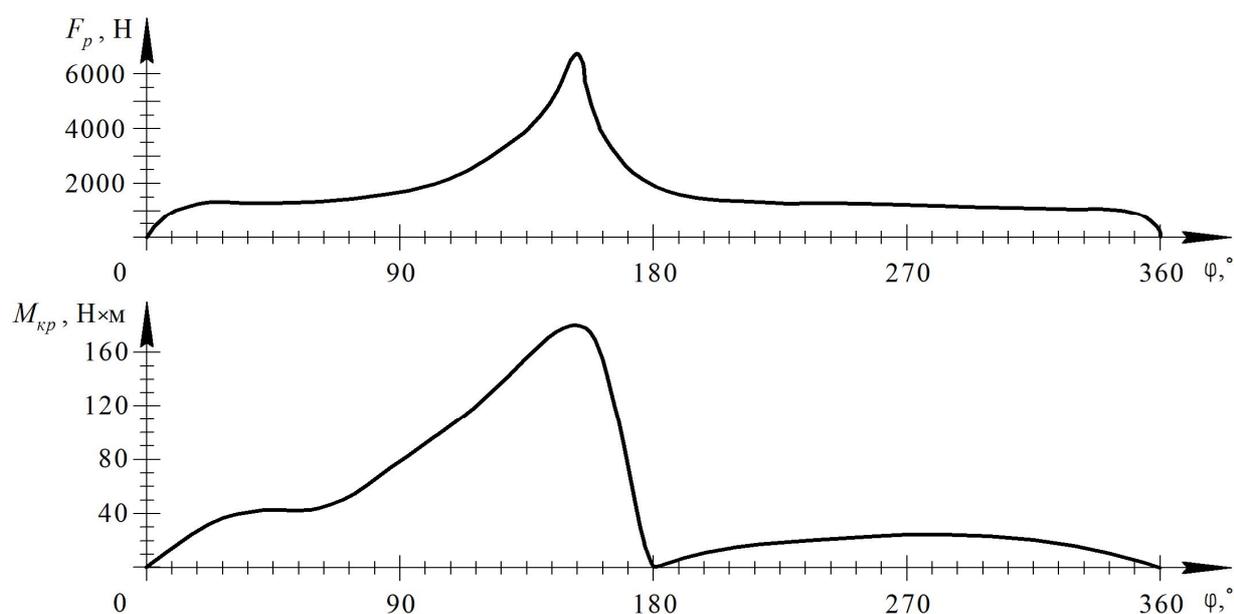


Рисунок 6 Нагрузочная диаграмма электромеханического привода ножниц при порезке трубы диаметром 20 мм с толщиной стенки 1 мм

Выбранный из каталога по полученному значению мощности электродвигатель проверяют на перегруз:

$$M_{max} / M_n \leq \lambda,$$

где M_{max} — максимальное значение момента, преодолеваемого приводом ножниц, взятое из нагрузочной диаграммы; M_n — паспортное значение номинального

момента, развиваемого выбранным двигателем привода; λ — допускаемое кратковременное превышение номинальной нагрузки по паспорту двигателя.

По приведённым зависимостям рассчитали энергосиловые параметры приводов ножниц, предназначенных для порезки тонкостенных труб различного диаметра (данные таблицы 1).

Таблица 1

Расчётные параметры привода ножниц для резки труб

Размеры трубы, мм		Максимальная силареза P , Н	Скорость движения ножа, м/с	Тип привода						
				Гидравлический			Электромеханический			
D	d			p_n , МПа	d_u , мм	Q , л/мин	$\omega_{кв}$, с ⁻¹	M_{max} , Нм	$M_{экв}$, Нм	N , кВт
10	9	4300	0,04	1,0	75	11	1,5	163	95	0,18
	8	8300		1,0	100	19		315	185	0,35
	6	11200		1,0	120	27		425	250	0,47
20	18	7200	0,04	2,0	65	8	1,5	273	160	0,3
	16	12000		2,0	90	15		456	265	0,5
	14	15000		2,0	100	19		570	330	0,62
30	28	9800	0,04	2,5	70	9	1,5	372	215	0,4
	26	14000		2,5	85	14		532	310	0,58
	24	17000		2,5	90	15		640	375	0,7

Экспериментальную проверку правильности расчётных данных выполнили на лабораторных ножницах, показанных на рисунке 3,а. В ходе эксперимента осуществляли контроль нагрузок, действующих на режущий механизм. При этом использовали тензометрический преобразователь, работающий в комплексе с усилителем, АЦП и ЭВМ. Тензодатчики сопротивлением 200 Ом, собранные в мостовую схему, наклеивали на боковые поверхности суппорта. Электрический сигнал, возникающий при разбалансе измерительного моста в момент силового взаимодействия ножа с разрезаемой трубой, по экранированному кабелю поступал на вход усилителя. Далее усиленный сигнал, представляющий собой напряжение переменного тока, преобразовывался АЦП в двенадцатиразрядный числовой код. Последующая обработка цифрового представления сигнала выполнялась ЭВМ в реальном масштабе времени при помощи прикладной программы OSCILLOSCOPE фирмы L-CARD, поставляемой в комплекте с АЦП. Для опытной резки использовали алюминиевую трубу диаметром 12 мм с толщиной стенок 1 мм.

На полученном графике изменения усилия резания во времени (рис. 7, б) можно выделить участки, соответствующие трём периодам процесса разделения трубного проката на части: началу внедрения ножа в тело трубы, сдвигу металла по плоскости резания и скалыванию (отрыву) оставшейся неразрезанной части сечения трубы [10].

Сопоставление расчётных значений силы резания с данными, полученными экспериментальным путём, показало, что максимальное расхождение между ними не превышало 15 %, т. е. предложенная методика определения энергосиловых параметров процесса резки труб клиновыми ножами приемлема для выполнения инженерных расчётов.

Благодаря компактности и относительно небольшой массе разработанный режущий блок, снабжённый гидроприводом, может быть легко встроен в конструктивную схему

летучих ножниц, работающих в потоке трубосварочного стана. В этом случае режущий блок с помощью специального механизма должен перемещаться вместе с трубой и приводиться в действие в момент выравнивания их скоростей. Причём привод механизма реза летучих ножниц следует дополнительно снабдить гидравлическим аккумулятором для осуществления ускоренной резки трубы в процессе её движения. Наличие аккумулятора позволяет отказаться от использования приводной маслостанции с большой объёмной подачей рабочей жидкости в силовой гидроцилиндр и тем самым снизить мощность её электродвигателя.

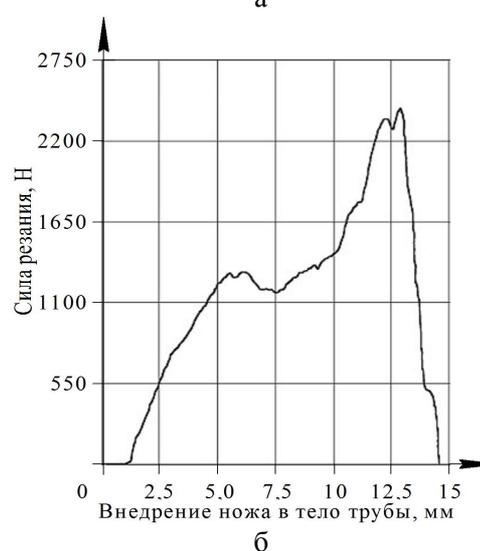
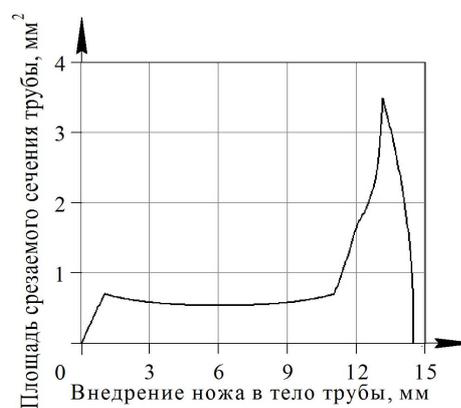


Рисунок 7 Изменение площади срезаемого сечения (а) и силы сопротивления, действующей на клиновое лезвие при резке алюминиевой трубы диаметром 12 мм с толщиной стенки 1 мм

Вместе с тем следует отметить, что применяемый в ножницах механизм фиксации трубы рассчитан на её конкретный типоразмер (наружный диаметр). Это требует замены двух пар неподвижных ножей при переходе на порезку профиля с другими геометрическими параметрами поперечного сечения и наличия необходимого сменного комплекта нижних ножевых блоков, соответствующих сортаменту производимых на стане тонкостенных труб.

Ножницы с механическим приводом рекомендуется применять в условиях проведения ремонтных работ, когда требуется автономность их функционирования, а про-

должительность реза не является лимитирующим фактором. В этом случае их можно размещать на тележке, благодаря чему легко менять положение на ремонтной площадке.

Выводы и направление дальнейших исследований. Практическое применение разработанных ножниц позволит предотвратить деформацию торцевых частей тонкостенных труб, разрезаемых на мерные длины в потоке трубосварочного стана, и тем самым устранить потери трубного профиля из-за необходимости удаления его деформированных частей, которые составляют от 0,5 до 1 % в зависимости от наружного диаметра.

Библиографический список

1. Ищенко, А. А. Пилы горячей резки проката. Конструкция и расчёт [Текст] : монография / А. А. Ищенко, Е. А. Лоза. — Мариуполь : ГВУЗ «ЛПТУ», 2012. — 251 с.
2. Лоза, Е. А. Исследование геометрических и энергосиловых характеристик при упрочнении пильных дисков [Текст] // Захист металургійних машин від поломок : зб. науков. праць. — Вип. 14. — Мариуполь. — 2012. — С. 130–135.
3. Карнаух, С. Г. Разработка оборудования для разделения сортового проката (труб) на мерные заготовки с применением нитинола [Текст] / С. Г. Карнаух, Д. С. Карнаух, Н. В. Чоста // Сб. научн. тр. ДГМА. — Краматорск : ДГМА. — 2015. — № 2. — С. 323–326.
4. Петров, П. А. Динамика усилий и моментов резания сортового металлопроката в горячем состоянии [Текст] / П. А. Петров, Е. В. Полилов, Д. И. Морозов // Сб. научн. трудов. ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ. — 2009. — Вып. 29. — С. 241–251.
5. 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.
6. Ульяницкий, В. Н. Влияние формы и расположения профиля на энергосиловые параметры резки фасонного металлопроката сортовыми ножницами [Текст] / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ. — 2016. — Вып. 3. — С. 149–156.
7. Моделирование процесса качественной резки тонкостенных труб на летучих ножницах [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. — Краматорськ, 2000. — С. 125–128.
8. Расчёт силы резания тонкостенных труб клиновыми ножами [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сб. научн. трудов. — Донецк : ДонНТУ. — 2003. — Вып. 24. — С. 61–66.
9. Королев, А. А. Механическое оборудование прокатных цехов чёрной и цветной металлургии [Текст] / А. А. Королев. — М. : Металлургия, 1976. — 544 с.
10. Теоретические и экспериментальные исследования силовых параметров процесса резки тонкостенных труб клиновыми ножами [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 5 [5]. — С. 15–21.

© Еронько С. П.
 © Ткачѐв М. Ю.
 © Ошовская Е. В.
 © Ковалѐва О. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., доц. каф. ОПМ ДонНТУ Ченцовым Н. А.,
д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.*

Статья поступила в редакцию 05.10.18.

д.т.н. Єронько С. П., к.т.н. Ошовська О. В., к.т.н. Ткачов М. Ю., Ковальова О. О. (ДонНТУ,
м. Донецьк, ДНР)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ НОЖИЦЬ ДЛЯ ЯКІСНОГО РІЗАННЯ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ

Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень параметрів роботи ножиць для якісного різання тонкостінних труб. Ножиці дозволяють реалізувати двохстадійний процес розділення труби на мірні довжини, при якому виключається зминання її торцевих поверхонь. Ріжучий блок ножиць може працювати з використанням як гідравлічного, так і електромеханічного приводів.

Ключові слова: тонкостінна труба, зминання торця, клиновий ніж, сила різання, гідроциліндр, маслостанція, крутний момент, електропривод.

Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P., PhD Oshovskaya E. V., PhD Tkachov M. Yu., Kovaleva O. A.
(DonNTU, Donetsk, DPR)

RESEARCH ON THE POWER AND FORCE PARAMETERS OF SHEARS FOR HIGH- QUALITY CUTTING OF THIN-WALLED PIPES

The results of theoretical and experimental studies on the working parameters of shears for high-quality cutting of thin-walled pipes are presented. Shears allow providing a two-stage process of dividing the pipe into dimensional lengths that eliminates crushing of its end surfaces. Shears' cutting unit can work using both hydraulics and electromechanical drives.

Key words: thin-walled pipe, end crushing, wedge knife, cutting force, hydraulic cylinder, oil station, torque, electric drive.