

УДК 621.961.2

**С. П. Еронько**, д-р техн. наук, проф., **Е. В. Ошовская**, канд. техн. наук, доц.  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

**О. А. Ковалева**,

ГБПОУ "Донецкий промышленно-энергетический колледж"

Тел.: +7 949 4055287; E-mail: [ersp52@mail.ru](mailto:ersp52@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛЕТУЧИХ НОЖНИЦ КАЧЕСТВЕННОЙ РЕЗКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

*В статье приведены описание конструкций и результаты лабораторных испытаний летучих механических и гидравлических ножниц, обеспечивающих качественную резку тонкостенных труб малого диаметра на мерные длины в потоке сварочного стана.*

**Ключевые слова:** тонкостенная труба, клиновой нож, летучие ножницы, механизм реза.

**S. P. Eron'ko, E. V. Oshovskaya, O. A. Kovaleva**

### DEVELOPMENT AND LABORATORY TESTING OF FLYING SHEARS FOR HIGH-QUALITY CUTTING OF THIN-WALLED SMALL-DIAMETER PIPES

*The article describes the designs and results of laboratory tests of volatile mechanical and hydraulic shears that provide high-quality cutting of thin-walled small diameter pipes to measured lengths in the flow of a welding mill.*

**Keywords:** thin-walled pipe, wedge knife, flying shears, cutting mechanism.

#### 1. Введение

Процесс изготовления тонкостенных электросварных труб, регламентируемый ГОСТ 137300, включает: нарезку узких полос из рулона стали и их сварку в сплошную ленту; формирование из нее полого профиля и получение методом сварки прочного шва; контроль качества шва методом дефектоскопии и порезку готовой продукции на мерные длины. Одним из качественных показателей такой трубной продукции является ее товарный вид, определяемый состоянием торцевых частей полого профиля, зависящим от способа его разделения на мерные длины и конструкции используемого при этом режущего устройства. В настоящее время разделение на мерные длины тонкостенных труб в потоке сварочного стана осуществляют с помощью летучих дисковых пил или установок абразивной резки, обеспечивающих приемлемое качество торцевых поверхностей выпускаемых полых профилей [1, 2, 3, 4]. Вместе с этим происходящий быстрый износ рабочего инструмента при таких способах резки и сопровождающие их значительный шумовой эффект, а также образование большого количества раскаленных металлических и пылевидных частиц требуют принятия специальных мер по охране труда. Поэтому в последнее время ведутся разработки альтернативных способов поперечной резки полых профилей, которые позволяют исключить действие указанных факторов [5, 6, 7]. При использовании для этих целей ножниц с клиновыми ножами производственники столкнулись с проблемой, обусловленной смятием торцов труб (рисунок 1 а – 1 в), что послужило мотивацией проведения научных работ с целью совершенствования систем, позволяющих реализовать двухстадийную резку тонкостенных полых профилей плоскими ножами, при которой удастся устранить пластическую деформацию торцевых поверхностей производимых труб (рисунок 1 г). Такая схема разделения на части трубного профиля предполагает предварительное ослабление его поперечного сечения за счет формирования лыски на наружной поверхности трубы

движущимся в поперечном направлении ножом и последующий рез опускающимся сверху клиновым ножом.

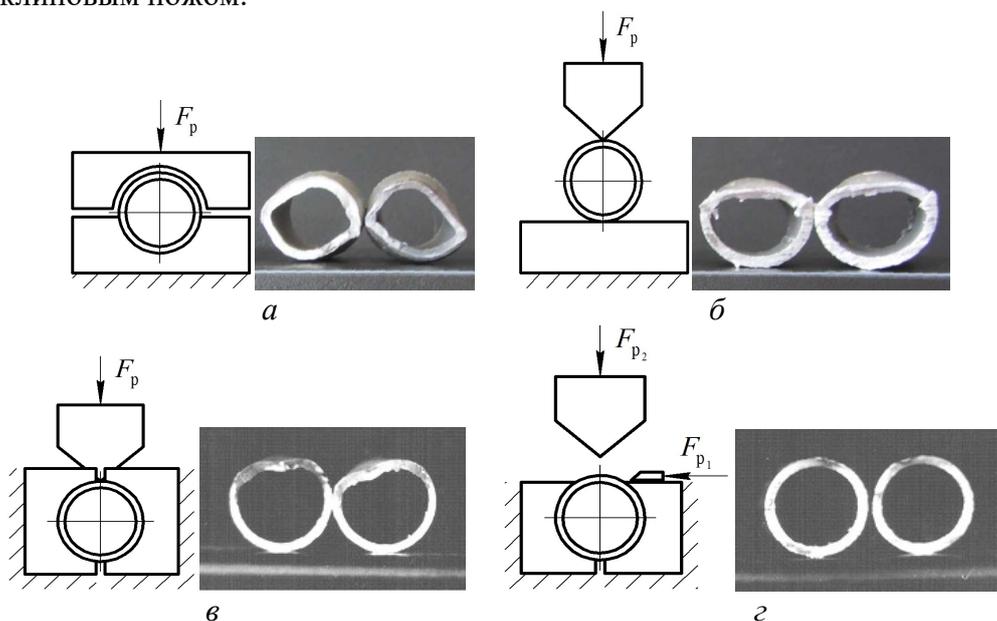


Рисунок 1. Существующие способы поперечной резки тонкостенных труб ножами и обеспечиваемое ими качество торцевых поверхностей полых профилей

При разработке перспективных образцов оборудования основными задачами, решаемыми проектировщиками, являются: выбор рациональной конструктивной схемы создаваемой системы, которая может быть механической или гидравлической; теоретическое обоснование энергосиловых параметров приводов ее структурных механизмов и предварительная практическая оценка первичных результатов изысканий.

Проверку правильности принятых технических решений и корректности расчетных зависимостей, используемых при получении информации о предполагаемых технологических нагрузках, во избежание возможных материальных потерь, целесообразно выполнять до начала проектирования опытно-промышленного образца нового оборудования, для чего в настоящее время применяют математическое и физическое моделирование. С учетом того, что расчеты деталей и узлов машин являются, как правило, приближенными, наиболее объективная оценка их результатов может быть дана по результатам экспериментальных исследований, проводимых на действующих натуральных моделях или лабораторных установках с привлечением различных методов контроля главных параметров работы машины или механизма.

## 2. Содержание и результаты выполненной работы

На кафедре «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша» Донецкого национального технического университета в течение последних пяти лет проводилась научно-исследовательские работа, связанная с совершенствованием ножниц, обеспечивающих качественную резку тонкостенных труб на мерные длины в потоке трубосварочного стана. При этом были предложены два варианта конструктивного исполнения режущих систем: с электромеханическим и гидравлическим приводами, позволяющими реализовать двухстадийный процесс разделения на части сварного полого профиля.

Летучие механические ножницы, схема которых приведена на рисунке 2 а, со-

держат ножевой блок 6, размещенный на двух горизонтальных цилиндрических направляющих 7 с возможностью относительного возвратно-поступательного перемещения с помощью механизма, включающего приводной электродвигатель 1, червячный редуктор 2 с двумя хвостовиками вала червячного колеса, на которых закреплены кривошипы 3, шарнирно связанные с шатунами 4, соединенными с основанием самого блока посредством пальцев 5.

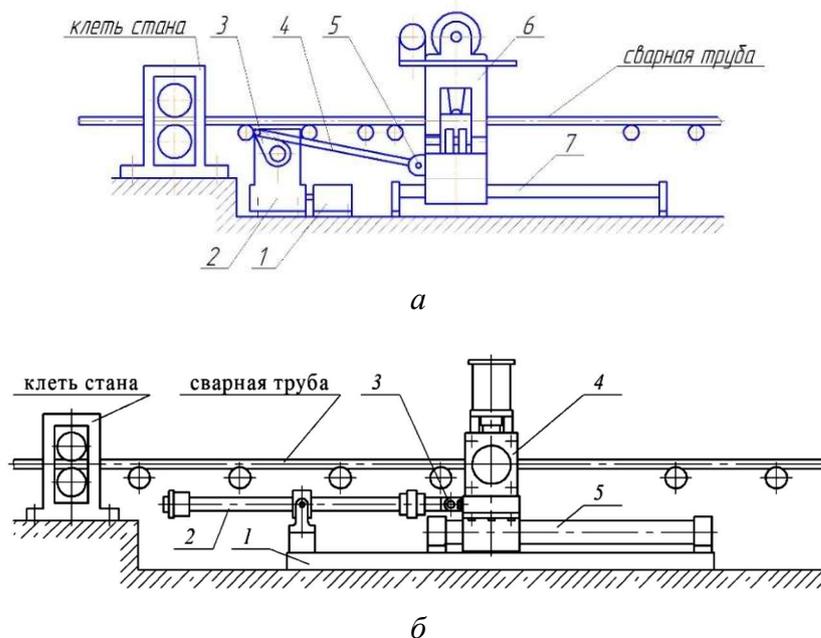


Рисунок 2. Структурные схемы разработанных летучих механических (а) и гидравлических (б) ножниц качественной поперечной резки тонкостенных труб малого диаметра

Структурная схема гидравлических летучих ножниц показана на рисунке 2б. Они содержат ножевой режущий блок 4, размещенный на двух горизонтальных цилиндрических направляющих 5 с возможностью относительного возвратно-поступательного перемещения с помощью приводного гидроцилиндра 2, шток которого посредством пальца 3 связан с корпусом режущего блока, а корпус в средней своей части шарнирно закреплен на основании 1.

Режущий блок механических ножниц (рисунок 3) включает станину 2 с внутренними направляющими, между которыми расположен суппорт 10, несущий клиновидный нож 3 и имеющий возможность вертикального перемещения с помощью электромеханического привода. Данный привод размещен на плитовине 5, жестко связанной с верхней частью станины 2, и включает одноколенный вал 6 с шатуном 4, тихоходную зубчатую передачу 17, двухступенчатый коническо-цилиндрический редуктор 8 и электродвигатель 7 постоянного тока. При этом колесо тихоходной зубчатой передачи является одной из шек одноколенного вала, а шатун 4 соединен с суппортом 10 посредством шарнира 9. В нижней части станины установлены с зазором две пары ножей-зажимов 1 для фиксации трубы в момент ее надреза горизонтально движущимся ножом. Смыкание ножей-зажимов 1 обеспечивается двумя клиньями 11, своей верхней частью прикрепленными к суппорту 10.

Требуемая последовательность взаимодействия между механизмом, обеспечивающим предварительный надрез трубы, и механизмом ее разделения на части реали-

зована за счет двух вертикальных 12 и одной горизонтальной 13 зубчатых реек, находящихся в зацеплении с размещенными на одном валу 14 зубчатыми колесами 15 и 16 с различными диаметрами делительных окружностей, соотносящимися между собой так, что скорость горизонтальной зубчатой рейки 13, несущей подрезной нож, превышает скорость движения вертикальных реек 12 в 1,2 раза [8].

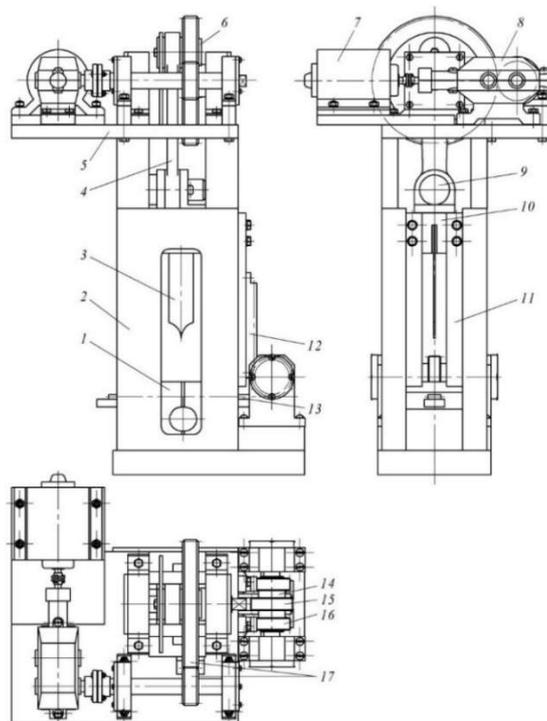


Рисунок 3. Конструкция режущего блока летучих механических ножниц

Режущий блок гидравлических ножниц, схематично показанный на рисунке 4, включает коробчатой формы корпус, состоящий из основания 17, двух пар продольных 11 и поперечных 3, 12 стенок, а также верхних брусьев 4, 10. Все элементы связаны

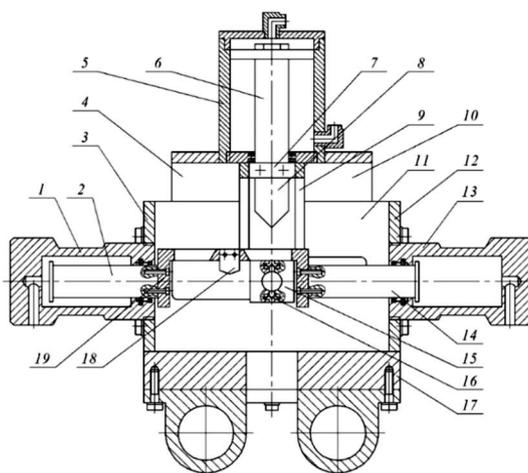


Рисунок 4. Конструктивная схема режущего блока гидравлических летучих ножниц

между собой с помощью болтов. На поперечных стенках посредством резьбовых соединений закреплены плунжерные гидроцилиндры 1, 13, расположенные горизонтально на одной оси. Плунжеры 2, 14 обоих цилиндров винтами соединены с горизонтальным П-образным суппортом 19, имеющим в верхней своей части две щелевые прорези, разделенные перемычкой, в пазу которой размещен подрезной нож 18. На верхних брусках 4, 10 корпуса блока закреплен вертикально расположенный гидроцилиндр двухстороннего действия 5. Его шток 6 несет суппорт 7, удерживающий клиновое лезвие 8 и снабженный четырьмя вертикальными брусками 9 квадратного сечения. Нижние части брусков имеют клиновидную форму и контактируют скошенными поверхностями с тыльными сторонами двух пар калиброванных ножей-зажимов 15. Между ножами-зажимами каждой из пар поддерживается заданный зазор за счет распирающего усилия, создаваемого двумя пружинами 16, находящимися в соосных цилиндрических углублениях. При этом обе пары ножей-зажимов образуют продольный зазор для беспрепятственного прохода между ними последовательно подрезного 18 и клинового 8 ножей [9].

Для обоснования конструктивных и энергосиловых параметров разработанных летучих ножниц провели исследования, связанные с определением технологической нагрузки, действующей на их привод. Сила воздействия клинового ножа на трубу может быть представлена как функция трех факторов: диаметра трубы  $D_{тр}$ , толщины стенки трубы  $\delta_{тр}$ , предела прочности материала трубы  $\sigma_{мт}$ :

$$P = f(D_{тр}, \delta_{тр}, \sigma_{мт}). \quad (1)$$

Для оценки степени влияния указанных факторов на функцию отклика и вывода эмпирической зависимости, позволяющей выполнять расчет максимального значения силы реза  $P_{max}$  клиновым ножом, выполнили планированный математический эксперимент по плану первого порядка, в результате которого получили зависимость:

$$P_{max} = 6691,1 - 1233,5D_{тр} - 3345,6\delta_{тр} - 22\sigma_{мт} + 616,7D_{тр}\delta_{тр} + 4,4D_{тр}\sigma_{мт}$$

Данная зависимость позволила определить технологическую нагрузку, которая должна учитываться при проектировании режущих блоков механических и гидравлических ножниц [10]. В таблицах 1 и 2 приведены данные расчетов параметров этих блоков двух типов ножниц, предназначенных для поперечной резки тонкостенных труб малого диаметра.

Учитывая то, что надежная работа режущих блоков разработанных ножниц и качество реза на них полых круглых профилей в немалой степени будет зависеть от правильного выбора геометрических параметров плоского клинового ножа, были также проведены теоретические исследования его напряженно-деформированного состояния на основе метода конечных элементов. В соответствии с составленной матрицей планирования  $2^4$ , выполнили 17 математических опытов по определению максимальных значений напряжений  $\sigma_{max}$  в режущей части ножа с использованием программы расчета параметров напряженно-деформированного состояния инструмента, изготовленного из материала, у которого модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,33$ .

Таблица 1. Расчетные значения энергосиловых параметров режущего механизма экспериментального образца ножниц

Размеры сечения трубы, мм		Максимальная сила реза, Н	Максимальный момент на коленвале, Н·м	Эквивалентный момент, Н·м	Угловая скорость коленвала, с <sup>-1</sup>	Мощность электродвигателя, кВт
D	δ					
10	1	4300	163	95	1,5	0,18
	1,5	8300	315	185	1,5	0,35
	2	11200	425	250	1,5	0,47
20	1	7200	273	160	1,5	0,3
	2	12000	456	265	1,5	0,5
	3	15000	570	330	1,5	0,62
30	1	9000	372	215	1,5	0,4
	2	14000	532	310	1,5	0,58
	3	17000	640	375	1,5	0,7

Таблица 2. Расчетные значения параметров гидравлического привода режущего механизма ножниц

Размеры сечения трубы, мм		Максимальная сила реза, Н	Скорость движения вертикального ножа, м/с	Параметры привода		
D	δ			Диаметр поршня цилиндра, мм	Рабочее давление насоса, МПа	Объемная подача насоса, л/мин
10	1	4300	0,1	75	1,0	24
	1,5	8300		100		48
	2	11200		120		66
20	1	7200		65	2,0	20
	2	12000		90		38
	3	15000		100		48
30	1	9800		70	2,5	23
	2	14000		85		34
	3	17000		90		38

Расчеты показали, что максимальные напряжения  $\sigma_{max}$ , возникающие в ноже при порезке полого круглого профиля, являются сложной функцией и зависят от следующих переменных (факторов):

$$\sigma_{max} = f(D_{тр}, \delta_{тр}, \delta_n, \sigma_{MT}) , \tag{2}$$

где  $D_{тр}$  – наружный диаметр трубы;  
 $\delta_{тр}$  – толщина стенки трубы;  
 $\sigma_{MT}$  – предел прочности материала трубы.  
 $\delta_n$  – толщина ножа.

Уравнение регрессии после перевода из кодированного в натуральный вид:

$$\sigma_{\max} = -114,25 - 1,5D_{\text{тр}} + 60,75\delta_{\text{тр}} + 1,2\sigma_{\text{мт}} + 28,975\delta_{\text{н}} - \\ - 8,625\delta_{\text{тр}}\delta_{\text{н}} - 0,215\sigma_{\text{мт}}\delta_{\text{н}} \leq [\sigma].$$

Площадь поперечного сечения клинового ножа, имеющего прямоугольную форму, рассчитывали, исходя из того, что ширина ножа  $b_{\text{н}}$ , а его толщина  $\delta_{\text{н}}$ . По максимальному значению силы реза  $P_{\max}$  для трубы с наибольшим диаметром, которая может быть разрезана на ножницах, выполняли проверку плоского клинового ножа на продольный изгиб (устойчивость) по формуле

$$\sigma = P/F_{\text{н}} \leq \varphi[\sigma]_{\text{сж}}, \quad (3)$$

где  $F_{\text{н}}$  - площадь поперечного сечения ножа, мм<sup>2</sup>;

$\varphi$  - коэффициент уменьшения допускаемого напряжения сжатия ножа, зависящий от его гибкости  $\lambda$ .

Расчетные значения размеров поперечного сечения ножей, полученные с учетом геометрических параметров и прочности материала разделяемых на части тонкостенных труб малого диаметра, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Рекомендуемые размеры поперечного сечения плоских клиновых ножей для резки тонкостенных труб малого диаметра

Параметры разделяемой на части трубы, мм		Предел прочности материала трубы, МПа	Размеры поперечного сечения плоского клинового ножа, мм	
наружный диаметр	толщина стенки		ширина	толщина
10	1	500	15	2
	1,5			
	2			
20	1		25	3
	2			
	3			
30	1		35	4
	2			
	3			

С целью экспериментальной проверки правильности технических решений, принятых при разработке конструкций летучих ножниц, рассчитали параметры приводов структурных механизмов и изготовили лабораторные образцы режущих систем [11], фото которых представлены на рисунке 5, а также обосновали параметры режущей части применявшихся в них клиновых ножей [12].

В соответствии с планом эксперимента, провели проверку работоспособности предложенных режущих систем, в ходе которой осуществляли порезку на мерные длины труб с наружным диаметром 10 мм и толщиной стенки 0,5 и 1 мм для последующей оценки обеспечиваемого качества реза. Фотографии полученных трубных образцов по-

казаны на рисунке 6, из которых видно, что смятия торцевых частей у них нет, т.е. оба типа ножниц обеспечивают реализацию двухстадийного процесса поперечной резки полых круглых профилей.

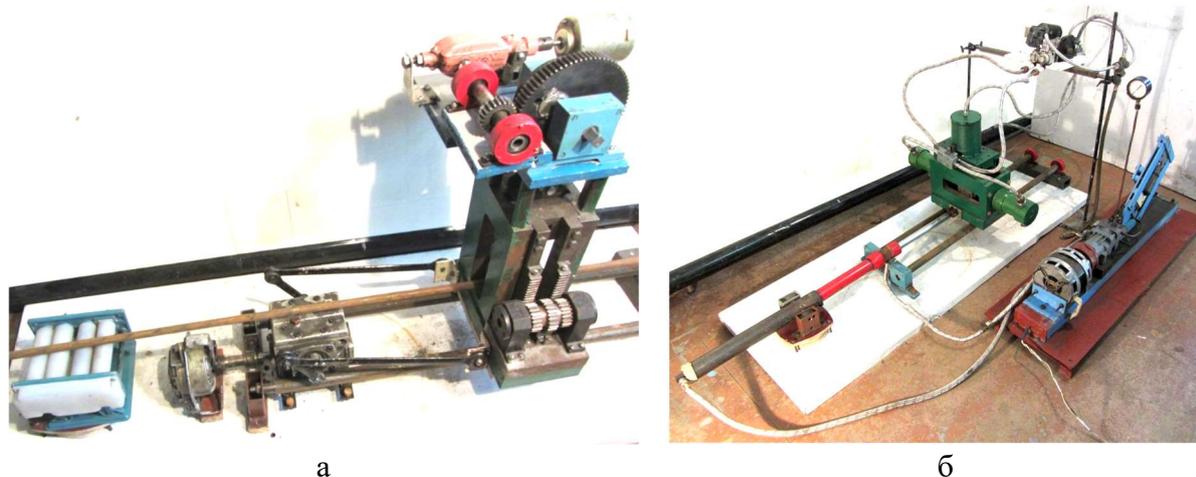


Рисунок 5. Лабораторные образцы механических (а) и гидравлических (б) летучих ножниц для резки труб на мерную длину



Рисунок 6. Образцы тонкостенных труб малого диаметра, разделенных на части с помощью механических (а) и гидравлических (б) лабораторных ножниц

Применённая в режущем блоке механических летучих ножниц двухречная система согласования последовательности движения подрезного и клинового ножей с заданными скоростями относительно разделяемой на части движущейся трубы, которая приводится в действие одним электродвигателем, позволяет уменьшить габариты и массу всего изделия в целом.

Наряду с этим, в ходе экспериментов, проводившихся на лабораторных гидравлических ножницах, был выявлен недостаток у системы их управления, которая включала профилированные кулачки, регулирующие работу золотников для подачи жидкости в полости исполнительных гидроцилиндров. Указанный недостаток был связан с износом рабочих поверхностей кулачков и необходимостью тщательной настройки их относительного положения, поскольку даже при незначительном угловом отклонении хотя бы одного из них происходил сбой в работе режущего блока. Поэтому дальнейшие работы по конструктивному совершенствованию гидравлических летучих ножниц бу-

дуг направлены на повышение надежности блока управления последовательностью срабатывания силовых гидроцилиндров за счет использования схемы с электромеханическим регулированием «по пути», обеспечивающим подачу сигналов о выполнении предшествующей команды при отработке заданной последовательности перемещений горизонтально движущегося подрезного ножа и вертикально опускающегося клинового ножа.

После конструктивной доработки с учетом выявленных недостатков предложенные летучие ножницы могут заменить существующие режущие системы, эксплуатируемые в настоящее время на трубосварочных станах. Как показала практика, наибольшие финансовые потери при производстве тонкостенных труб на стане ЗАО «Донецксталь» были связаны с тем, что из-за одностадийной резки полых профилей клиновым ножом на используемых летучих ножницах обе торцевые части получаемого мерного куска трубы имели деформируемые участки, длина которых в зависимости от наружного диаметра профиля, составляла от 5 до 25 мм.

Перед использованием трубной продукции по назначению дефектные части подлежат удалению на отрезных станах и могут использоваться в качестве оборотного лома. Разница в цене на качественную трубу и металлический лом, а также дополнительные трудовые и энергетические затраты, требуемые для отделения от трубы дефектных торцевых частей, в совокупности формируют материальные убытки, вызываемые несовершенством используемого технологического оборудования. Поэтому применение разработанных ножниц, позволяющих исключить деформацию торцевых частей труб, обеспечит получение экономического эффекта за счет устранения указанных финансовых потерь. Ожидаемый экономический эффект от внедрения выполненной разработки на трубосварочном стане с годовым производством 100000 т труб составит 20 млн. руб. Срок окупаемости затрат, необходимых для промышленной реализации предложенной разработки, не превысит 2-х лет.

### 3. Заключение

Результаты лабораторных экспериментов подтвердили правильность технических решений, заложенных в конструкции механических и гидравлических режущих систем, которые могут быть использованы для разделения на части полых тонкостенных круглых профилей малого диаметра в потоке трубосварочного стана, обеспечивая при этом повышение качества выпускаемой продукции за счет устранения деформации торцевых частей мерных кусков труб.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кравченко, В. М. Повышение стойкости дисков летучей пилы для порезки тонкостенных труб / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. В. Буцукин // Защита металлургических машин от поломок. Сб. науч. тр. - Мариуполь: ГВУЗ «ЛГТУ».- 2010.- Вып. 12.- С. 222 – 225.
2. Петров, П. А. Оценка основных причин замены дисков пил горячей резки / П. А. Петров // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. Вып. 22. С. 173 – 179.
3. Петров, П. А. Исследование надежности пил горячей резки проката / П. А. Петров, В. А. Шпаков, В. А. Павленко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2007. Вып. 33. С. 201 – 208.
4. Петров, П. А. Уменьшение износа дисковых пил горячей резки сортового ме-

таллопроката / П. А. Петров, Ю. В. Изюмов // *Металлургические процессы и оборудование*. - 2011.- № 1 (23).- С. 30 – 36.

5. Стеблюк, В. И. Методы усовершенствования способов резки труб на короткие заготовки / В. И. Стеблюк // *Обработка металлов давлением*. Сб. науч. тр.- Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия.- 2009.- № 1.- С. 287 – 290.

6. Стеблюк, В. И. Последовательность резки тонкостенной трубчатой заготовки сдвигом вращающихся оправок / В. И. Стеблюк, Д. Н. Савченко, Д. Б. Шкарлута // *Вестник национального технического университета Украины «Харьковский политехнический институт»*. Сб. научн. тр. – Харьков: ХТУ «ХПИ», 2010. № 43. С. 141 – 146.

7. Стеблюк, В. И. Экспериментальные исследования усовершенствованного метода резки трубчатых заготовок одновременным сдвигом и кручением / В. И. Стеблюк [и др.] // *Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*: сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 2010. № 1(22). С. 179 – 182.

8. Механические ножницы для качественной резки тонкостенных труб на заготовки / С. П. Еронько [и др.] // *Заготовительные производства в машиностроении*. - 2019.- Том 17. № 11.- С. 502 – 507.

9. Еронько, С. П. Разработка и экспериментальные исследования гидравлических летучих ножниц для резки тонкостенных труб / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, О. А. Ковалева // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*.- 2019.- № 17. (60).- С. 89 - 97.

10. Ошовская, Е. В. Аналитический метод определения силы поперечной резки трубы клиновым ножом / Е. В. Ошовская, О. А. Ковалева // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института*.- 2022.- № 26 (69).- С. 96 - 103.

11. Исследование энергосиловых параметров ножниц для качественной резки тонкостенных труб / С. П. Еронько [и др.]. // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*.- 2018.- № 11. (54).- С. 131 - 135.

12. Еронько, С. П. Исследование напряженно-деформированного состояния плоских ножей для резки тонкостенных труб / С. П. Еронько [и др.] // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация*.- 2021.- Т. 77. № 9 .- С. 1039 – 1046.

Поступила в редколлегию 30.01.2024 г.