

УДК 621.774.3

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

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ РЕЗА ТРУБЫ КЛИНОВЫМ НОЖОМ

Приведены методика и результаты экспериментальных исследований условий формирования очага деформации в зоне силового воздействия клинового ножа на трубу в начальной стадии процесса ее разделения на части, при которых исключается смятие торцевых поверхностей разрезаемого на ножницах полого профиля.

Ключевые слова: тонкостенная труба, клиновой нож, напряженно-деформированное состояние, сила резания, смятие, поперечное сечение.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Процесс поперечной резки тонкостенной трубы ножом, перемещающимся перпендикулярно ее продольной оси, включает три стадии: частичное смятие поверхности полого профиля, внедрение в его тело режущей кромки ножа и относительный сдвиг разделяемых элементов. При этом пластическая деформация поверхности трубы в зоне силового воздействия ножа развивается по-разному в зависимости от формы его режущей кромки [1, 2], наружного диаметра и толщины стенки, а также прочностных свойств материала разрезаемого металлического профиля [3, 4].

Постановка задачи. Целью данной работы является изучение условий формирования очага деформации в зоне реза тонкостенной трубы в начальной стадии процесса ее разделения на части клиновым ножом.

Изложение материала и его результаты. Результаты анализа данных, полученных в ходе специально проведенных экспериментов, свидетельствуют о необходимости использования схемы комбинированной резки тонкостенной трубы с предварительным ослаблением ее поперечного сечения в месте внедрения ножа. В про-

тивном случае, независимо от геометрической формы режущего инструмента, торцевая часть полого профиля будет в различной степени деформирована. Для сравнения на рисунке 1 приведены фотографии образцов тонкостенной трубы, разделенной на части при различных схемах резки.

Тонкостенная труба, представляющая собой замкнутую цилиндрическую оболочку, при полярно симметричном силовом воздействии ножа в начальный момент реза подвергается деформации, в результате которой ее верхняя выпуклая часть изгибается вдоль оси переменным моментом, вызываемым поперечной силой. В кольцевом направлении она испытывает растяжение или сжатие, а также чистый изгиб моментом, не зависящим от угловой координаты [5]. Поэтому полученная опытным путем информация о форме и размерах очага деформации, формирующегося в зоне реза тонкостенной трубы с момента касания ее поверхности клиновым ножом до начала внедрения его режущей части в тело полого профиля, послужит основой при теоретическом обосновании силовых параметров ножниц, конструируемых для применения как в потоке трубосварочного стана, так и в условиях заготовительных производств.

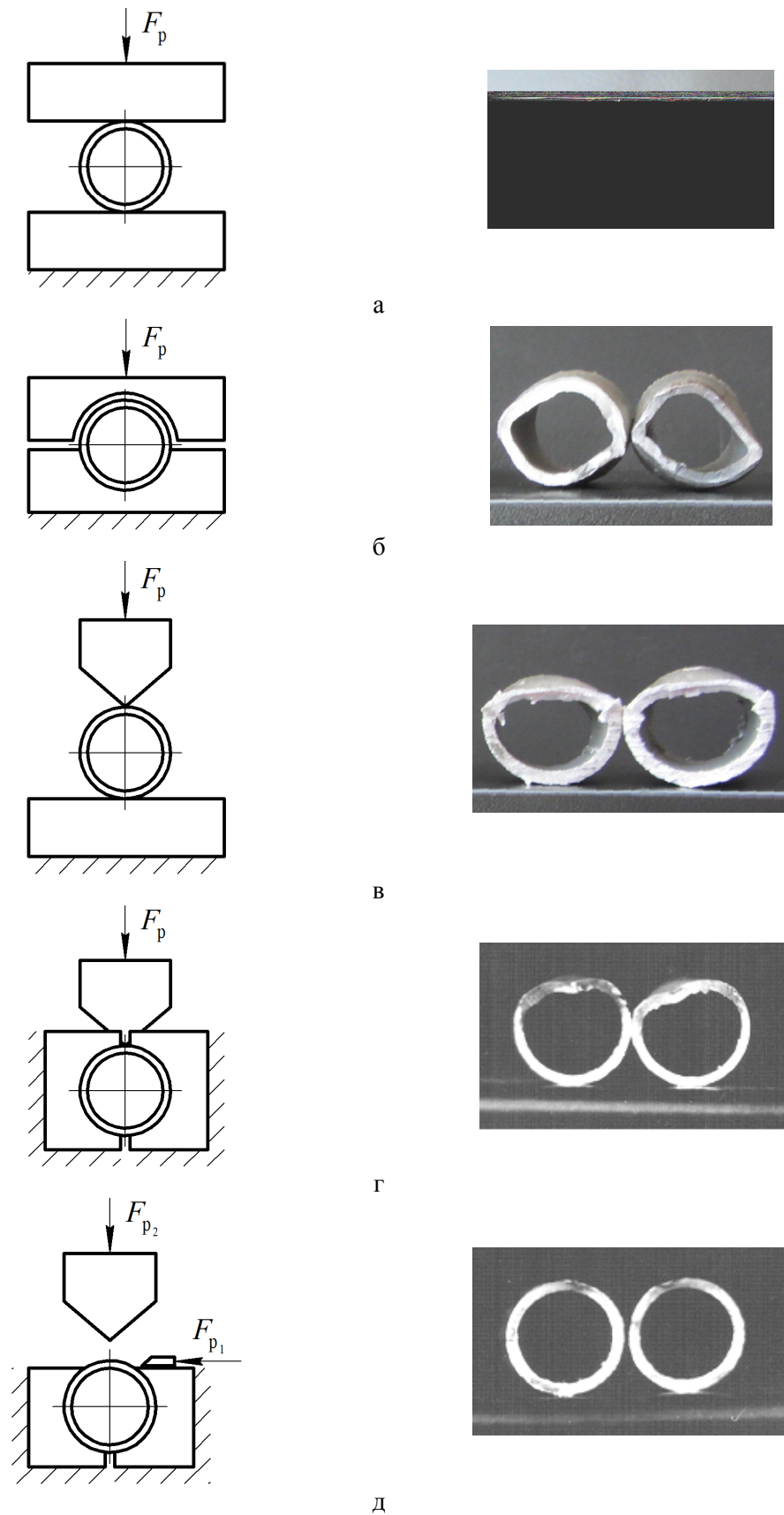


Рисунок 1 Состояние торцовых частей трубы при различных схемах разделения ее на части

Проведение экспериментальных исследований с целью получения целостной картины силового взаимодействия режущего инструмента с разделяемым на части тонкостенным полым профилем предполагает наличие специальных установок и контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющих с требуемой точностью фиксировать значения технологических и силовых параметров процесса резки металлических труб.

Для получения опытным путем информации о форме и размерах очага деформации, формирующегося в зоне реза тонкостенной трубы с момента касания ее поверхности клиновым ножом, разработали и изготовили стенд, включающий силовой режущий блок и измерительную систему. Силовой режущий блок, конструкция которого показана на рисунке 2, включает опорную пластину 1, несущую рамку 15, посредством резьбового соединения связанную с нижними концами вертикальных стяжек 8 и 12. Верхние концы этих стяжек жестко соединены со специальной гайкой 10, имеющей трапецеидальную резьбу и находящуюся в зацеплении с нажимным

винтом 9. Между самими стяжками размещен с возможностью относительного перемещения в вертикальном направлении суппорт 5, удерживающий клиновым нож 13, под которым на несущей рамке 15 закреплена сменная разрезная втулка 14. На суппорте 5 соосно с клиновым ножом 13 установлена месдоза 6 с компенсирующей медной вставкой 7, имеющей в своей верхней торцевой поверхности углубление в виде полусферы. Такое же углубление имеется на нижнем торце нажимного винта 9, благодаря чему он посредством стального шарика 11 фиксирует соосное положение компенсирующей вставки 7 и обеспечивает равномерную передачу нагрузки на месдозу 6. К стяжке 8 посредством планки 3, имеющей возможность относительного перемещения и фиксации в нужном положении, прикреплен стрелочный индикатор 2, контактирующий своим подвижным стержнем 4 с консольной накладкой суппорта 5 и позволяющий при соответствующей настройке контролировать ход клинового ножа 13 относительно сменной разрезной втулки 14, а значит, и размещаемого внутри нее образца тонкостенной трубы.

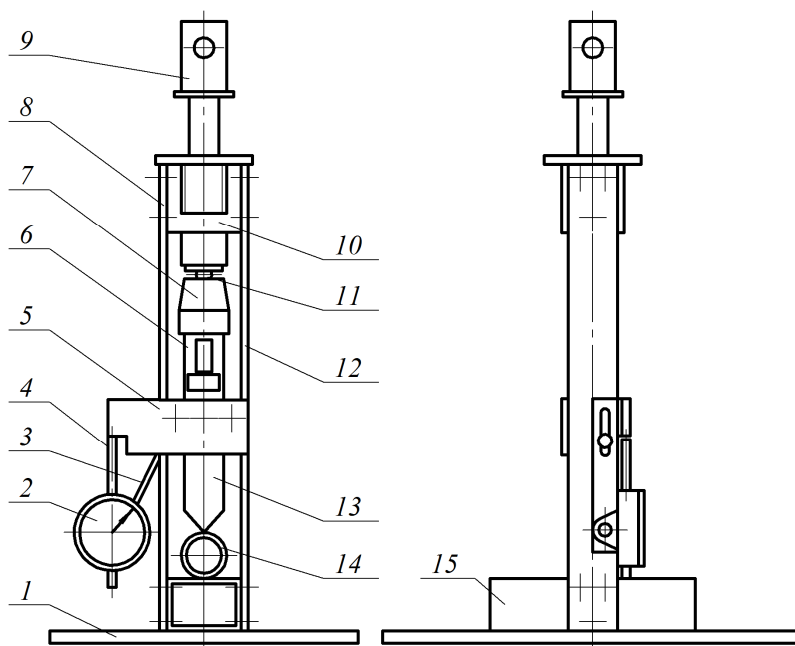


Рисунок 2 Конструкция силового режущего блока испытательного стенда

Контрольно-измерительная система, также входящая в состав испытательного стенда, предназначена для получения информации о силовом воздействии клинового ножа на тонкостенную трубу. Система содержит месдозу, экранированный кабель для ее электрической связи с усилителем переменного тока, а также показывающий прибор, отображающий значения фиксируемого аналогового сигнала.

Месдоза конструктивно выполнена в виде полого стального цилиндра, на наружной поверхности которого с помощью специального клея закреплены четыре фольговых тензодатчика, соединенные по мостовой схеме. Причем два из них размещены вдоль образующей цилиндра и являются рабочими, а два других — в кольцевом направлении, т. е. служат для температурной компенсации моста сопротивлений.

В качестве инструментария испытательного стенда подготовлен сменный комплект разрезных втулок для труб с разным наружным диаметром (фото на рис. 3). В теле каждой втулки выполнены два резьбовых отверстия, благодаря которым их последовательно можно с помощью винтов фиксировать на несущей рамке под клиновым ножом силового режущего блока, а также поперечно расположенная прорезь для входа клинового ножа.



Рисунок 3 Сменный комплект разрезных втулок для фиксации труб различного диаметра на несущей рамке режущего блока

В ходе проводимых исследований на испытательном стенде (фото на рис. 4) для каждого контрольного образца по показаниям индикатора фиксировали прогиб верхней выпуклой поверхности трубы, при котором начинается внедрение режущей кромки клинового ножа в ее тело, а также с помощью месдозы, подключенной к усилителю, отмечали соответствующее значение силы, необходимой для формирования в этом случае очага деформации [6]. Полученную информацию использовали для теоретического обоснования силовых параметров процесса реза труб клиновым ножом.

Как показали результаты экспериментов, очаг деформации в зоне воздействия клинового ножа на трубу силой P имеет форму, близкую к кругу с радиусом $R_{оч}$ (рис. 5). Разобьем этот круг на n равных секторов, угол которых составит $\frac{2\pi}{n}$. Длина каждого отрезка dx , на которые разбит периметр очага деформации тела трубы

$$dx = R_{оч} \frac{2\pi}{n} = \frac{6,28}{n} R_{оч}. \quad (1)$$

Нагрузка со стороны ножа на каждый из выделенных секторов

$$P_i = \frac{P}{n}. \quad (2)$$

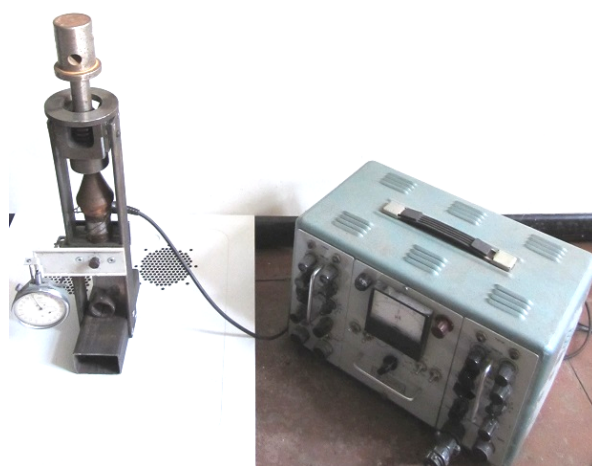


Рисунок 4 Испытательный стенд, подготовленный к проведению исследований

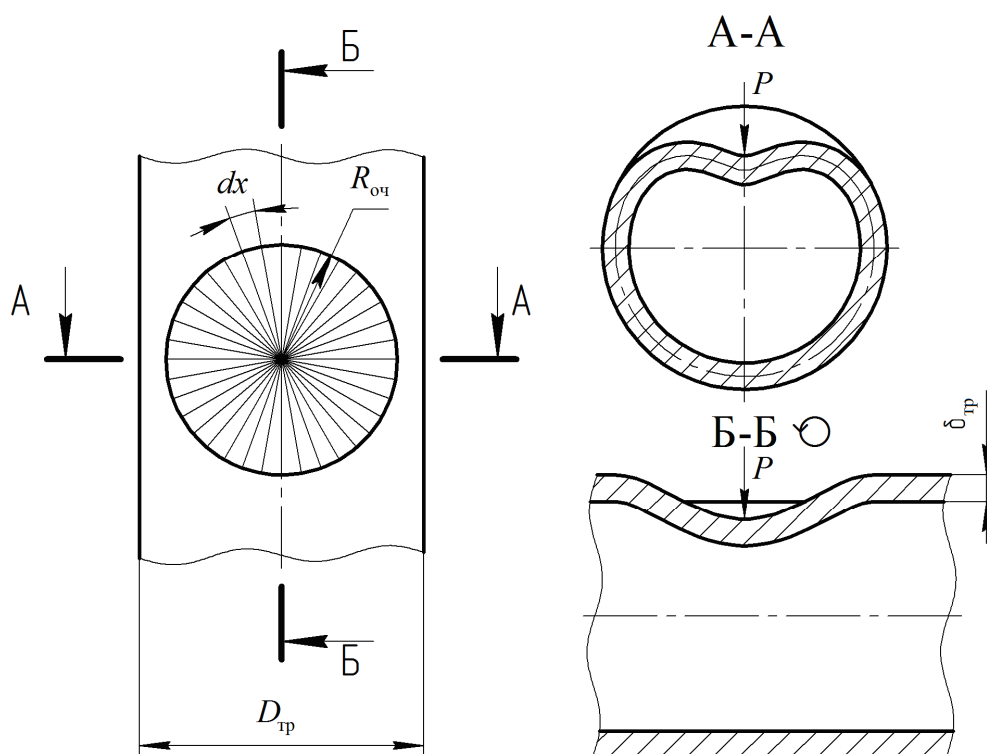


Рисунок 5 Форма очага деформации тонкостенной трубы в зоне силового воздействия клиновидного ножа

Каждый из секторов подвергается воздействию изгибающего момента

$$M_{из_i} = P_i R_{оч} = \frac{P}{n} R_{оч}. \quad (3)$$

Напряжения в теле трубы в каждом из выделенных секторов, вызванные изгибом, составят

$$\sigma_{из_i} = \frac{M_{из_i}}{W_i}, \quad (4)$$

где W_i — момент сопротивления сечения стенки трубы выделенного сектора.

$$W_i = \frac{dx \cdot \delta_{тр}^2}{6} = \frac{6,28 R_{оч} \delta_{тр}^2}{6n} = \frac{1,05 R_{оч} \delta_{тр}^2}{n}. \quad (5)$$

Тогда

$$\sigma_{из_i} = \frac{P R_{оч} n}{1,05 R_{оч} \delta_{тр}^2 n} = \frac{P}{1,05 \delta_{тр}^2}. \quad (6)$$

Напряжения сдвига при внедрении клиновидного ножа в тело трубы

$$\tau_{ср} = \frac{P}{F_{ср.т}}, \quad (7)$$

где $F_{ср.т}$ — суммарная площадь срезаемых слоев материала трубы.

Значение $F_{ср.т}$ в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рисунке 6

$$F_{ср.т} = F_1 + 2F_2, \quad (8)$$

где F_1 — площадь прямоугольника в плоскости сдвига $OCC'O'$;

F_2 — площадь треугольника в плоскостях сдвига OAB и $O'A'B'$.

Принимая конструктивно

$$\delta_n = k_n \delta_{тр}, \quad (9)$$

где k_n — коэффициент пропорциональности, равный 1...1,5,

$$F_1 = \delta_n \delta_{тр} = k_n \delta_{тр}^2. \quad (10)$$

Принимая угол $\alpha = 90^\circ$, в первом приближении

$$F_2 \approx 0,5\delta_{\text{тр}} \cdot 2\delta_{\text{тр}} \approx \delta_{\text{тр}}^2. \quad (11)$$

Тогда

$$F_{\text{ср.т}} = k_n \delta_{\text{тр}}^2 + 2\delta_{\text{тр}}^2 = (k_n + 2)\delta_{\text{тр}}^2. \quad (12)$$

Подставив полученное выражение в формулу (7), получим

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{P}{(k_n + 2)\delta_{\text{тр}}^2}. \quad (13)$$

Сопоставляя выражения (6) и (13), можно сделать заключение о том, что при одной и той же нагрузке со стороны ножа на трубу напряжения, вызываемые изгибом, минимум в три раза превышают значения напряжения сдвига. Поэтому при порезке тонкостенной трубы клиновым

ножом по одностадийной схеме неизбежна деформация торцевых частей разрезанного полого круглого профиля, так как внедрению ножа в тело трубы предшествует образование вогнутости ее поверхности. Для устранения смятия торцевой части трубы необходима двухстадийная ее резка, предполагающая предварительное ослабление стенки профиля в зоне силового воздействия на него клинового ножа. Уменьшения жесткости стенки трубы можно достичь путем выполнения на ее верхней выпуклой части лыски, как показано на рисунке 7.

При этом минимальную толщину стенки трубы в зоне реза следует назначать с учетом коэффициента ослабления поперечного сечения $K_{\text{о.с.}}$ разделяемого на части полого профиля.

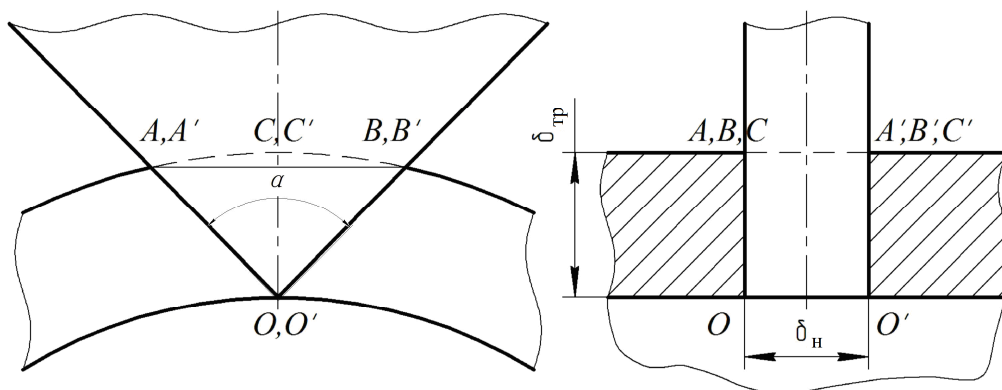


Рисунок 6 Расчетная схема для определения суммарной площади среза материала при внедрении клинового ножа в тело трубы

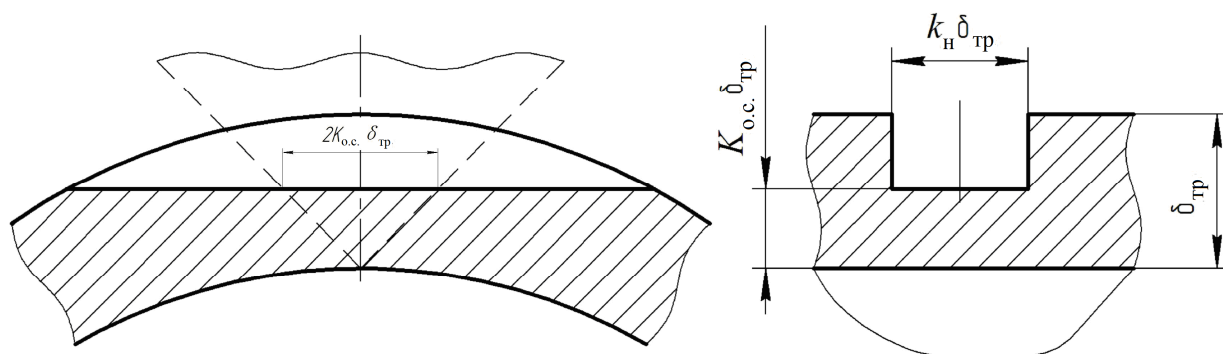


Рисунок 7 Расчетная схема для определения минимального значения коэффициента $K_{\text{о.с.}}$

Учитывая, что для материала трубы предельные напряжения при изгибе и сдвиге [7] составляют $\sigma_{\text{из}} = 0,6\sigma_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{ср}} = 0,7\sigma_{\text{в}}$, минимальное значение коэффициента $K_{\text{о.с.}}$ можно определить исходя из условия равенства силы $P_{\text{и}}$, изгибающей перемычку, и силы $P_{\text{ср}}$, срезающей ее.

Изгибающий момент, действующий на перемычку

$$M_{\text{и}} = 0,5P_{\text{и}}K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}} = 0,6\sigma_{\text{в}}W.$$

Откуда

$$P_{\text{и}} = 1,2(\sigma_{\text{в}}W)/(K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}).$$

Здесь W — момент сопротивления поперечного сечения перемычки

$$W = k_{\text{н}}\delta_{\text{тр}}(K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}})^2.$$

Тогда

$$P_{\text{и}} = (1,2\sigma_{\text{в}}k_{\text{н}}\delta_{\text{тр}}K_{\text{о.с.}}^2\delta_{\text{тр}}^2)/(K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}) = 1,2\sigma_{\text{в}}k_{\text{н}}K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}^2.$$

Принимаем $k_{\text{н}} = 1,5$,

$$P_{\text{и}} = 1,8\sigma_{\text{в}}K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}^2.$$

Сила сдвига

$$P_{\text{ср}} = \tau_{\text{ср}}F = 0,7\sigma_{\text{в}}F.$$

Суммарная площадь срезаемого сечения

$$F = 2(0,5 \cdot 2K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}) + K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}K_{\text{н}}\delta_{\text{тр}} = 2K_{\text{о.с.}}^2\delta_{\text{тр}}^2 + 1,5K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}^2.$$

$$P_{\text{ср}} = 0,7\sigma_{\text{в}}(2K_{\text{о.с.}}^2\delta_{\text{тр}}^2 + 1,5K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}^2).$$

При равенстве $P_{\text{и}}$ и $P_{\text{ср}}$

$$1,8\sigma_{\text{в}}K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}^2 = 0,7\sigma_{\text{в}}(2K_{\text{о.с.}}^2\delta_{\text{тр}}^2 + 1,5K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}}^2).$$

После преобразования получим

$$1,4K_{\text{о.с.}}^2 - 0,75K_{\text{о.с.}} = 0.$$

Поскольку один из коэффициентов данного квадратного уравнения равен нулю, то

$$K_{\text{о.с.}} = \frac{0,75}{1,4} = 0,54.$$

Это значение коэффициента позволяет при заданной толщине стенки $\delta_{\text{тр}}$ предварительно рассчитать требуемую толщину срезаемого слоя $h_{\text{ср}}$, при которой гарантированно устраняется смятие торцевых частей трубы, разрезаемой на мерные длины клиновым ножом

$$h_{\text{ср}} = \delta_{\text{тр}} - K_{\text{о.с.}}\delta_{\text{тр}} = \delta_{\text{тр}}(1 - K_{\text{о.с.}}) = 0,46\delta_{\text{тр}}. \quad (17)$$

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований были использованы при расчете летучих ножниц, предназначенных для применения в потоке трубосварочного стана при порезке тонкостенных полых профилей на мерные длины [8], а также малогабаритных стационарных ножниц с механическим приводом, рекомендуемых к эксплуатации в условиях заготовительных производств машиностроительных предприятий [9].

Выводы и направление дальнейших исследований. Предложенная методика расчета параметров процесса поперечной резки на части тонкостенных труб клиновыми ножами пригодна для инженерных расчетов при проектировании новых эффективных ножниц, позволяющих исключить смятие торцевых частей производимой трубной продукции. Дальнейшие исследования следует продолжить с целью обеспечения качественной резки широкого сортамента полых профилей.

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Еронько, С. П. Теоретические и экспериментальные исследования силовых параметров процесса резки тонкостенных труб клиновыми ножами [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 5. — С. 15–21.
5. Шевченко, Ф. Л. Механика упругих деформируемых систем. Ч. 2. Сложное напряженное состояние [Текст] / Ф. Л. Шевченко. — К. : ИСИО, 1998. — 240 с.
6. Лабораторный стенд для исследования начальной стадии процесса резания тонкостенных труб клиновым ножом [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса : сб. тр. 6-й Межд. науч.-практ. конф. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ДонНТУ, 2020. — С. 40–45.
7. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие [Текст] / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. — М. : Машиностроение, 1975. — 488 с.
8. Еронько, С. П. Разработка и экспериментальные исследования гидравлических летучих ножниц для резки тонкостенных труб [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, О. А. Ковалева // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2019. — № 17 (60). — С. 89–97.
9. Механические ножницы для качественной резки тонкостенных труб на заготовки [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. — 2019. — Т. 17. — № 11. — С. 502–507.

© Еронько С. П.
 © Ошовская Е. В.
 © Ковалёва О. А.
 © Ткачёв М. Ю.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТИ Куберским С. В.,
 д.т.н, проф. каф. МОЗЧМ им. В. Я. Седуша ДонНТУ Сидоровым В. А.**

Статья поступила в редакцию 16.11.2020.

**Doctor of Technical Sciences Yeronko S. P., PhD in Engineering Oshovskaya Y. V.,
 Kovaleva O. A., PhD in Engineering Tkachov M. Yu. (DonNTU, Donetsk, DPR)
 STUDYING THE CONDITIONS OF DEFORMATION AREA FORMATION IN PIPE
 CUTTING ZONE WITH WEDGE KNIFE**

There have been given the method and results of experimental studies of conditions of deformation area formation in force impact zone of wedge knife on pipe in the initial stage of its separation into parts, at which collapsing of butt ends of hollow profile cut on shears is excluded.

Key words: thin-walled pipe, wedge knife, strain-stressed state, cutting force, collapsing, cross section.