

УДК 621.967.1

к.т.н. Ульяницкий В.Н.,
Петров П.А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОФИЛЯ НА ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗКИ ФАСОННОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА СОРТОВЫМИ НОЖНИЦАМИ

В статье проведен анализ влияния формы разрезаемого сечения и относительного направления реза на эффективность разделительной операции при обработке фасонного металлопроката сортовыми ножницами.

Ключевые слова: фасонный металлопрокат, сортовые ножницы, сила резки, работа резки, уголок, швеллер, полоса, штрипс.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Разделение фасонного металлопроката на мерные длины является весьма важной и ответственной задачей при проектировании нового и модернизации действующего технологического оборудования в современном сортопрокатном производстве. Существующие способы получения мерных заготовок из сортового проката можно разделить на две группы: 1) основанные на процессах механической резки, сопровождающиеся образованием отходов; 2) способы безотходного разделения сортового проката, основанные на процессах обработки металлов давлением. С учетом того, что операции поперечного разделения являются заключительными в технологической цепи производства сложнопрофильного металлопроката (уголок, двутавр, швеллер и т. п.) и выполняются над товарным продуктом, к качеству и энергоэффективности процесса резки предъявляют особые требования [1, 2].

В связи с этим способы резки, исключаяющие стружкообразование, характеризующиеся высокими материалосберегающими, экономичными показателями и увеличенной (более чем в 2 раза) производительностью, являются перспективными для дальнейшей разработки и совершенствования [3, 4].

Основными показателями процесса резки, подразделяющегося на три этапа (вмя-

тие ножей в металл, сдвиг или собственно рез, отрыв), являются сила P и работа резки A , определение которых принято проводить по известным методикам А. И. Целикова [5]. Вместе с этим указывается, что при определении максимального значения силы резки фасонными ножами (квадрат по диагонали) можно использовать результаты, полученные для случая резки параллельными ножами заготовки с сечением, равным по площади.

Однако, как следует из [2], положение и форма профиля относительно направления движения ножей, оказывают влияние на силу и работу резки. Так, опираясь на результаты работы [6], было показано, что распределение силы резки в зависимости от хода ножей и температурно-деформационных параметров имеет сложный характер. Погрешность определения максимальной силы резки по отношению к известным методам расчета [5] может сократиться в 2,58 раза при резке квадрата параллельными ножами и в 7,17 раза при разделении квадрата по диагонали. Это обусловлено учетом реальной геометрии профиля и кинематикой развития очага деформации, реализованными описанной ранее математической моделью [7].

В свою очередь, необходимость использования фасонных (фигурных) ножей при осуществлении разделительных операций сортовых профилей на ножницах усложняет методику расчета и требует дополне-

ния соответствующих алгоритмов; при этом вопрос определения сил резки применительно к фланцевым профилям в литературе освещен недостаточно.

Постановка задачи.

Цель работы – провести анализ влияния формы разрезаемого сечения и относительного направления реза на эффективность разделительной операции при обработке фасонного металлопроката сортовыми ножницами.

Комплексный подход к решению задач энергоэффективности процесса резки сложнопрофильного металлопроката невозможен без создания математических моделей с последующим обобщением и анализом полученных результатов.

Изложение материала и результаты.

Для вычисления силы резки фасонными ножами 1 и 3 швеллера 2 следует рассмотреть расчетную схему на рисунке 1. На рисунке обозначены следующие параметры: H – высота полки; t_p – толщина полки; B – ширина стенки; t_s – толщина стенки.

Ввиду симметрии швеллера относительно вертикальной оси можно рассматривать только половину сечения. В правой половине сечения выделяем точки т.2 и т.3, координаты которых определяют продолжительность характерных зон (уча-

стков) швеллера, отсчитываемые от начала координат (точка т.1) вдоль оси абсцисс.

В общем виде их координаты определяются следующими выражениями (рис. 1, а):

$$\text{т.1 } [0; 0], \text{ т.2 } [0,5 \cdot B - t_p; 0],$$

$$\text{т.3 } [0,5 \cdot B; 0].$$

Сила резки в зависимости от глубины внедрения ножа y на характерных участках сечения I и II , имеющих исходную высоту $h_x^I = t_s$, $h_x^{II} = H$ (рис. 1, б), и с учетом того, что площадь выделенного элементарного объема на удалении x определяется как $ds = h_{\varepsilon_x} \cdot dx$, может быть вычислена интегралом вида:

$$P(y) = 2 \int_{x_{т.1}}^{x_{т.2}} \tau_{\varepsilon_x}^I h_{\varepsilon_x}^I dx + 2 \int_{x_{т.2}}^{x_{т.3}} \tau_{\varepsilon_x}^{II} h_{\varepsilon_x}^{II} dx, \quad (1)$$

где y – суммарное смещение ножей в процессе резки;

$h_{\varepsilon_x} = h_x - y$ – текущая высота сечения (рис. 1, б), вычисляемая в зависимости от участка профиля по следующим выражениям: $h_{\varepsilon_x}^I = t_s - y$, $h_{\varepsilon_x}^{II} = H - y$;

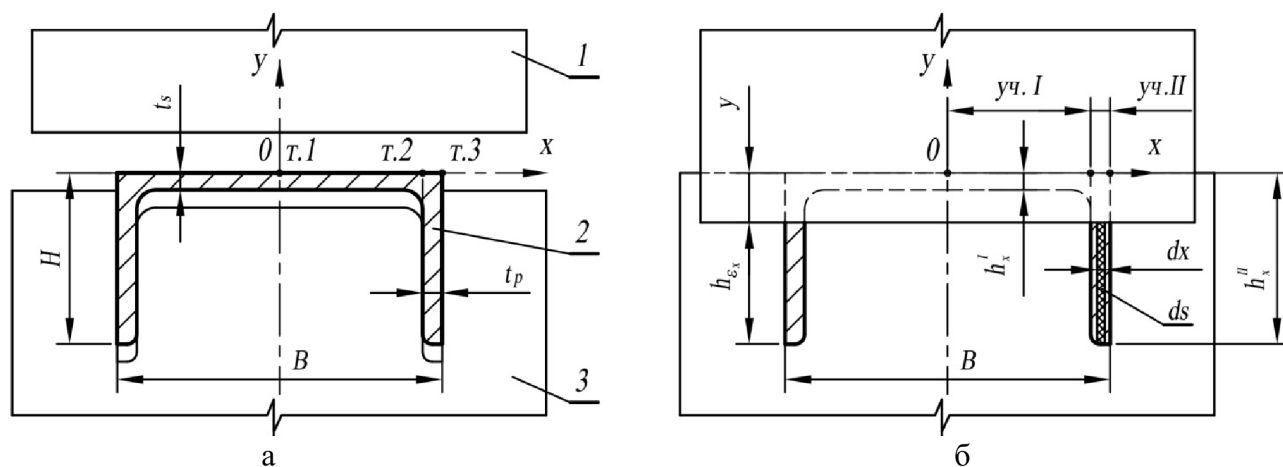


Рисунок 1 – Схема к определению силы резки швеллера фасонными ножами; а – расположение ножей и заготовки до начала резки; б – в процессе резки

τ_{ε_x} – сопротивление срезу по сечению заготовки от оси к периферии, учитывающее влияние величины относительного надреза ε_H и механических свойств материала [6]:

$$\tau_{\varepsilon_x} = \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{H_x}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{H_x}} \right)^{0,35}, \quad (2)$$

$\varepsilon_x = \frac{y}{h_x}$ – текущее внедрение, в зависи-

мости от участка: $\varepsilon_x^I = \frac{y}{t_s}$, $\varepsilon_x^{II} = \frac{y}{H}$,

ε_{H_x} – текущее относительное внедрение до скола, при котором происходит полное разделение рассматриваемого элементарного объема;

σ_b – предел прочности разрезаемого материала.

В итоге зависимость силы резки от глубины внедрения y будет иметь следующий вид:

$$P(y) = 2k^I \int_{x_{т.1}}^{x_{т.г}} [\tau_{\varepsilon_x} (t_s - y)] dx + 2k^{II} \int_{x_{т.2}}^{x_{т.г}} [\tau_{\varepsilon_x} (H - y)] dx, \quad (3)$$

где k^I и k^{II} – критерий, определяющий влияние соответствующего характерного участка сечения на силу резки в зависимости от хода ножа y через заготовку:

$$k^{I,II} = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq h_{np}^{I,II} \leq k_{раз}; \\ 0 & \text{при } h_{np}^{I,II} > k_{раз}, \end{cases} \quad (4)$$

где h_{np} – предельная (до разрушения) высота рассматриваемого элементарного объема на характерном участке: $h_{np} = y / (\varepsilon_{H_x} \cdot h_x)$;

$k_{раз} = 1,0 \div 1,5$ – коэффициент, определяющий момент наступления разрушения, зависящий от материала заготовки, на-

стройки ножниц и состояния режущих кромок ножей; определяется эмпирически; для пластичных материалов и новых ножей – $k_{раз} = 1,0$.

На рисунке 2 представлены экспериментальные I и теоретические II зависимости силы резки от относительного внедрения $\varepsilon = y/H$ ножей в металл при разделении швеллера 10x20x10x1,9 мм из алюминиевого сплава АА6063 [8].

Из представленных графиков можно увидеть, что результаты экспериментов хорошо согласуются с теоретическими зависимостями. Максимальная сила резки, полученная эмпирически $P_э = 16,75$ кН, рассчитанная аналитически $P_т = 15,97$ кН, погрешность $\Delta = 4,66\%$. Это позволяет использовать разработанную методику определения силы резки при моделировании подобных процессов. Аналогичные зависимости, описывающие изменение силы резки, от хода ножа были получены для случаев разделения равнобокого уголка, круга и квадрата [6], что позволяет рассмотреть различные схемы реализации процесса и выявить из них наиболее эффективные.

Для выявления характера влияния формы и положения разрезаемого сечения на силу и работу деформации были выбраны сортовые профили с одинаковой площадью поперечного сечения ($S = 91,39$ мм²), но разной формы: уголок равнобокий, швеллер и полоса (штрипс). Сечения отобранных профилей и их расположение в ножевых калибрах представлены на рисунке 3. Следует отметить, что пространственные положения профиля углового равнобокого в ножевых калибрах, представленные на рисунке 3 (в, г) (угол наклона полок относительно горизонтали $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 20^\circ$), на практике не применяются и приведены в данной работе исключительно в исследовательских целях.

Используя представленные выше зависимости (1)–(4), описывающие характер изменения силы резки в зависимости от хода ножа при разделении швеллера, и результаты

опубликованных ранее работ по резке квадрата (прямоугольника) и углового профиля ножей, представленные на рисунке 4. [6], мы получили распределения силы резки в зависимости от относительного смещения ножей, представленные на рисунке 4.

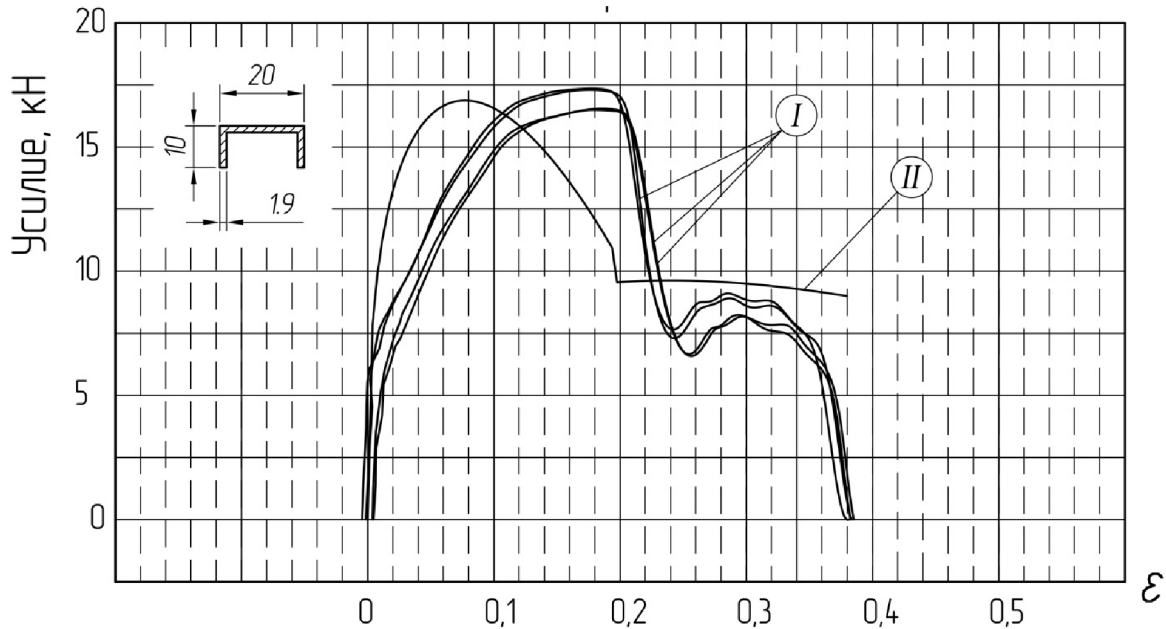


Рисунок 2 – Осциллограммы *I* и теоретические зависимости *II* силы резки швеллера 10x20x10x1,9 мм

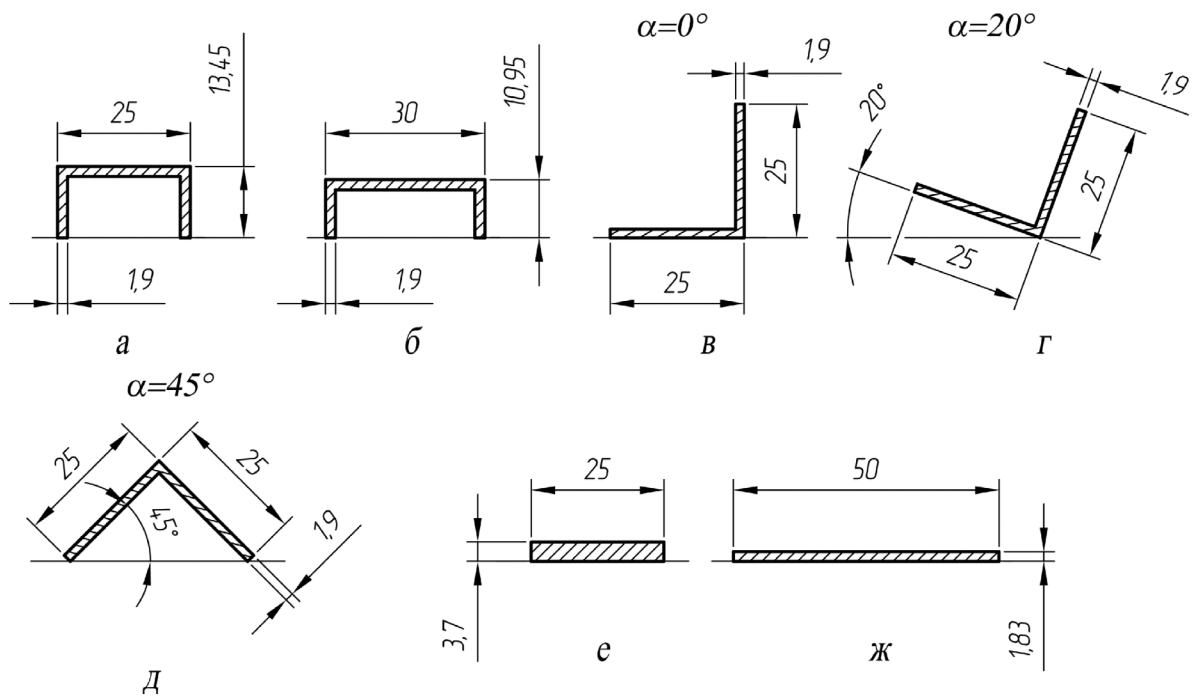


Рисунок 3 – Типы профилей и их положение при резке в ножевых калибрах: а, б – швеллер; в, г, д – уголок равнобокий, соответственно расположенный относительно горизонтали под углом $\alpha = 0^\circ, 20^\circ, 45^\circ$; е, ж – полосовой профиль

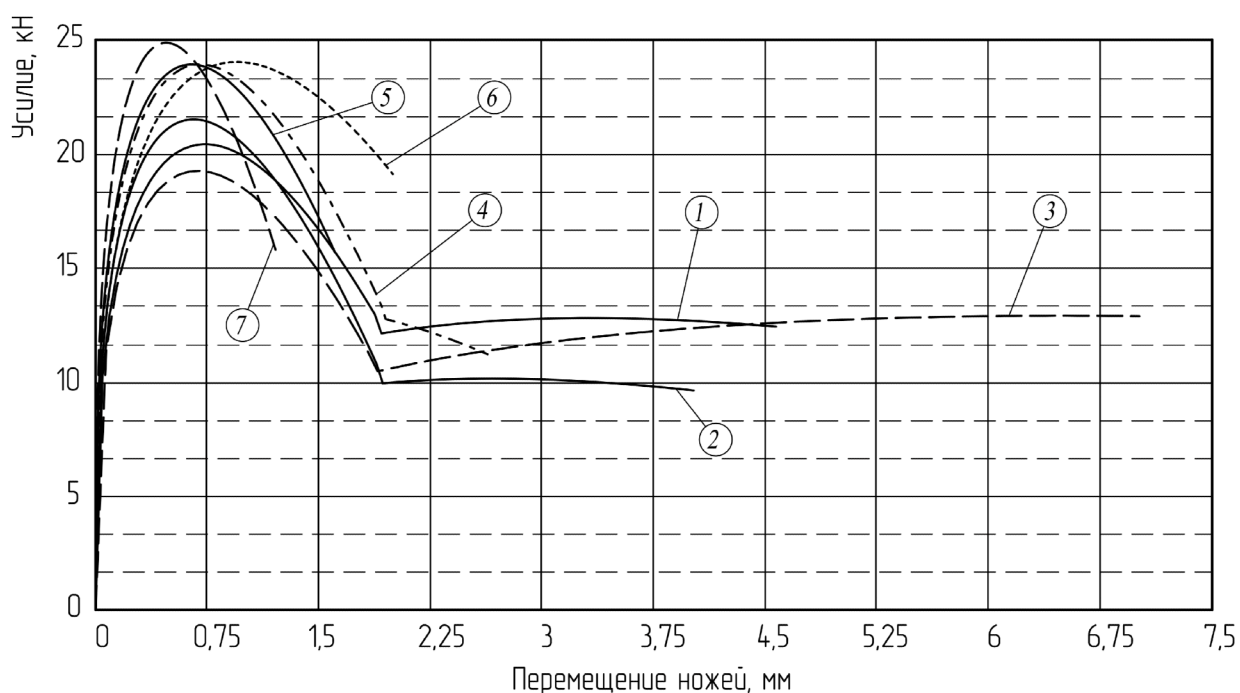


Рисунок 4 – Зависимости силы резки от перемещения ножей при разделении равных площади сечения фасонных профилей и штрипса на сортовых ножницах: 1 – швеллер 13,45x25x1,9 мм (рис. 3, а); 2 – швеллер 10,95x30x1,9 мм (рис. 3, б); 3 – уголок равнобокий 25x25x1,9 мм при $\alpha = 0^\circ$ (рис. 3, в); 4 – при $\alpha = 20^\circ$ (рис. 3, г); 5 – при $\alpha = 45^\circ$ (рис. 3, д); 6 – профиль прямоугольный 25x3,66 мм (рис. 3, е); 7 – профиль прямоугольный 50x1,83 мм (рис. 3, ж)

Анализ графических зависимостей позволяет оценить влияние формы разрезаемого профиля на распределение силы резки P и суммарную работу A . Наибольшая сила резки $P_{max} = 24,87$ кН действует при разделении прямоугольного сечения 50x1,83 мм (кривая 7, рис. 4). По мере уменьшения ширины профиля (или его горизонтальной проекции) сила резки уменьшается и минимальное значение, соответствующее обработке равнобокого уголка 25x25x1,9 мм при $\alpha = 0^\circ$ (рис. 3, в), составит $P_{min} = 19,25$ кН (кривая 3, рис. 4). Важно то, что площади поперечных сечений указанных заготовок одинаковы. Такое распределение силы резки характерно для всех рассмотренных случаев расположения заготовок. Смещение углового профиля из ортогонального положения ($\alpha = 0^\circ$) приводит к значительному возрастанию максимальной силы резки: $P_{\alpha=0^\circ} = 19,25$ кН (кривая 3, рис. 4),

$P_{\alpha=45^\circ} = 23,92$ кН (кривая 5, рис. 4). Однако располагать сечение под нетехнологичным углом (например $\alpha = 20^\circ$) нерационально ввиду незначительного снижения максимальной силы резки, что можно проследить по кривым 4, 5 (рис. 4).

При проектировании оборудования на предельные нагрузки необходимо знать величину максимальной силы резки. Не менее важным параметром является работа резки A , влияющая на энергоэффективность установки ножниц. Ее величина определяется площадью между графиком функции $P(y)$ и осью абсцисс. Выражение для расчета работы резки имеет вид:

$$A = \int P(y) dy. \quad (5)$$

Работа резки максимальна в случае разделения равнобокого уголка 25x25x1,9 мм в положении, соответствующем $\alpha = 0^\circ$ (рис. 3, в), и составляет $A_{max} = 93,66$ Дж.

Минимальное значение $A_{min} = 25,93$ Дж получено при резке прямоугольного сечения $50 \times 1,83$ мм. Это подтверждает, тот факт, что работа резки возрастает по мере увеличения хода ножей через заготовку и зависит от максимальной ординаты контура профиля. Поэтому располагать уголок в положении, соответствующем $\alpha = 0^\circ$ (рис. 3, в), несмотря на минимальную силу резки, не следует. Практическую ценность представляет сравнение работы резки фланцевых профилей, чему соответствуют кривые 1, 2, 4, 5 на рисунке 4. Работа резки швеллера $13,45 \times 25 \times 1,9$ мм (кривая 1, рис. 4) составляет $A_1 = 67,13$ Дж; равнобокого уголка $25 \times 25 \times 1,9$ мм при $\alpha = 45^\circ$ (кривая 5, рис. 4) – $A_5 = 33,37$ Дж. Работа резки A_5 почти в 2 раза меньше работы резки A_1 , несмотря на равенство площадей поперечного сечения выбранных заготовок.

Выводы и направления дальнейших исследований.

Для выявления влияния формы и расположения разрезаемого сечения на эффективность разделительных операций была создана математическая модель, описывающая процессы резки фланцевых профилей.

Библиографический список

1. Трофимчук В.Д. Дефекты прокатной стали и меры борьбы с ними / В.Д. Трофимчук. — М. : Металлургия, 1954. — 632 с.
2. Соловцов С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах / С.С. Соловцов. — М. : Машиностроение, 1985. — 175 с.
3. Трусковский В.И. Развитие теории и практики производства заготовок обработкой давлением на основе совершенствования методов анализа НДС, создания новых способов и устройств: дис. ... доктора техн. наук: спец. 05.02.09 "Технология и машины обработки давлением" / В.И. Трусковский. — Челябинск, 2014. — 260 с. +прил.
4. Карнаух С.Г. Разработка оборудования для разделения сортового проката (труб) на мерные заготовки с применением нитинола / С.Г. Карнаух, Д.С. Карнаух, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. — Краматорск : ДГМА, 2015. — № 2 (41). — С. 323–326.
5. Целиков А.И. Прокатные станы : учебник для вузов / А.И. Целиков, В.В. Смирнов. — М. : Metallurgizdat, 1958. — 432 с.
6. Боровик П.В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей / П.В. Боровик, П.А. Петров // Металлургическая и горнорудная промышленность. — Днепрпетровск, 2013. — № 5. — С. 41–44.

Полученные значения максимальной силы и работы резки при различных схемах реализации процесса разделения фланцевых профилей сортовыми ножницами позволяют уточнить и расширить классические представления.

Максимальная сила резки зависит от ширины разрезаемого профиля. Отклонение между максимальным $P_{max} = 24,87$ кН и минимальным $P_{min} = 19,25$ кН значениями составляет 23%.

Максимальная работа резки также зависит от высоты разрезаемого профиля. Отклонение между максимальным $A_{max} = 93,66$ кН и минимальным $A_{min} = 25,93$ кН значениями составляет 72%, а при обработке только фланцевых профилей – 50%, что следует считать значительным.

Анализ результатов вычислений силы резки и работы резки, а также полученные величины отклонений указывают на необходимость рационального подхода при проектировании нового и модернизации действующего технологического оборудования наряду с совершенствованием методик описания процесса резки сложнопрофильного металлопроката сортовыми ножницами.

7. Боровик П.В. Особенности процесса холодной резки квадратной заготовки на сортовых ножницах / П.В. Боровик, П.А. Петров // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — Вып. 38. — С. 190–196.

8. Цвияк А.П. Краткий справочник машиностроителя-международника /А.П. Цвияк. — СПб .: Питер, 2011. — 384 с.: ил.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Харламовым Ю.А.,
д.т.н., проф. ЛГТУ им. Даля Гутько Ю.И.**

Статья поступила в редакцию 23.05.16.

к.т.н. Ульяницький В.Н., Петров П.О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ВПЛИВ ФОРМИ І РОЗТАШУВАННЯ ПРОФІЛЮ НА ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ РІЗАННЯ ФАСОННОГО МЕТАЛОПРОКАТУ СОРТОВИМИ НОЖИЦЯМИ

У статті проведено аналіз впливу форми перетину, що розрізається, і відносного напрямку різа на ефективність розділювальної операції при обробці фасонного металопрокату сортовими ножницями.

Ключові слова: фасонний металопрокат, сортові ножниці, сила різання, робота різання, профіль кутовий, швелер, смуга, штрипс.

PhD in Engineering Ulianitskii V.N., Petrov P.A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

INFLUENCE OF SHAPE AND POSITION OF A SECTION ON ENERGY-POWER PARAMETERS WHEN CUTTING A SHAPED STEEL-ROLLED STOCK WITH SHEARS FOR SECTION IRON

In the paper there has been given the analysis of influence of cutting profile shape and relative cut direction on efficiency of separation process for shaped steel-rolled stock with section shearing machine.

Key words: shaped steel-rolled stock, section shearing machine, cutting power, cutting work, L-bar, channel bar, bar, candy.