

ростного упрочнения материала по его твердости Вісник НТУ «ХПІ» тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. - № 45. – С. 119-124. – ISSN 2079-5459.

7. John O. Hallquist. LS-DYNA theoretical manual / John O. Hallquist. Livermore Software Technology Corporation. – 1998.

8. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

9. Bestimmung der Streckgrenze und der Hall-Petch-Konstanten des Verguetungsstahles 42CrMo4 unterschiedlichen Gefueges mittels Eindruckpruefungen / Fr.-W. Bach, M. Schaper, F. Nuernberger, Chr. Krause, O.

Grydin // Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie. – 2006. – № 37 (8). – P. 668-673.

10. Грушко А.В. Развитие использования метода твердости по Бринеллю для определения напряжения текучести при холодной деформации // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2013. – № 1. – С. 36-39.

11. Грушко А.В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія Машиностроение. – 2010. - № 60. – С. 133-137. – ISSN 2305-9001.

Поступила 04.07.2013

УДК 621.967.1

Боровик П.В. /к.т.н./
ДонГМА

Наука

Петров П.А.
ДонГТУ

Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей

Исследованы особенности поперечного разделения сортовых заготовок на ножницах и уточнена методика расчета энергосиловых параметров процесса резки фасонных профилей на ножницах. На базе совместных теоретических и экспериментальных исследований, на примере алюминийевого сплава АА6063, получены уточненные зависимости силы резки для квадратного и круглого сечений, а также уголка. Результаты работы могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров процесса резки фасонных профилей на ножницах. Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: ножницы, фасонный нож, фасонный профиль, поперечное разделение, сила резки

Developing methods for calculation of power output at separating process for shaped sections using the shears. Peculiarities of sectional separation of billets with the shears are studied and power output calculation method for the cutting of billets using the shears is specified. Basing on the united theoretical and practical researches having AA6063 aluminum alloy as a sample, there have been obtained specified dependencies of cutting force both for square and circle shaped sections and for a corner as well. Results of the work can be used for calculating of power output at cutting of shaped sections with the shears.

Keywords: shears, shaped shears, shaped sections, sectional separation, cutting force

В современных условиях развития металлургической промышленности весьма актуальными являются вопросы расширения технологических возможностей уже эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования за счет повышения точности производимых конструкторских расчетов и увеличения степени научной обоснованности при принятии проектных и технологических решений.

В различных технологических схемах производства сортового металлопроката широко применяют операции поперечного разделения на ножницах [1-4]. При этом повышение требований к качеству готового металлопроката и стремление расширить технологические возможности ножниц способствуют повышению интереса в данной области [5, 6].

Основным исходным технологическим параметром, определяющим конструкцию ножниц, производительность и надежность их эксплуатации, а также сортамент разрезаемых профилей является сила резки.

Классическими подходами к определению максимальной силы резки являются хорошо известные

методики А.И. Целикова, В.В. Носаля и А.А. Королева [1, 2], которые наименее трудоемки и базируются на экспериментальных данных резки параллельными ножами. Для более сложных профилей максимальную силу резки определяют, как и для условий резки параллельными ножами заготовок с эквивалентной площадью сечения.

Однако, как показывает практика [3, 7], даже при разделении заготовок одинакового квадратного сечения в условиях резки параллельными и фасонными (по диагонали) ножами наблюдается различие в максимальной величине силы резки. В [3] представлена методика расчета для условий горячей резки квадрата по диагонали, но вопрос разделения на ножницах профилей более сложного сечения остается открытым. Таким образом, требуется дальнейшее развитие и уточнение методов расчета энергосиловых параметров процесса резки сортовых профилей на ножницах, что необходимо для совершенствования технологий и оборудования.

В качестве цели данной работы ставилась задача

© Боровик П.В., Петров П.А., 2013 г.

исследовать особенности поперечного разделения сортовых заготовок на ножницах и уточнить методику расчета энергосиловых параметров процесса.

Для достижения указанной цели проводили совместные теоретические и экспериментальные исследования на примере алюминиевого сплава АА6063.

По аналогии с [8], в основу теоретических исследований, была положена одномерная математическая модель процесса резки параллельными и фасонными ножами, которая базируется на численном рекуррентном решении конечно-разностной формы статического равновесия по определению геометрических характеристик и энергосиловых параметров в рамках каждого отдельно выделенного элементарного объема очага резки (рис. 1).

зом [1-4]

$$P(\varepsilon) = \int_s \tau_\varepsilon ds, \quad (1)$$

где τ_ε – сопротивление срезу, при относительной глубине внедрения ε , характеризующей отношение величины внедрения ножей в металл к исходной высоте разрезаемого сечения; ds – остаточная площадь выделенного элементарного объема, разрезаемого сечения.

При этом сопротивление срезу (рис. 1а) определяется выражением [8]

$$\tau_\varepsilon = \tau_{max} (\varepsilon/\varepsilon_n)^{\alpha_\tau} = \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_n} (\varepsilon/\varepsilon_n)^{\alpha_\tau}, \quad (2)$$

где τ_{max} – максимальное сопротивление срезу; σ_b – предел прочности разрезаемого материала; ε_n – относительное внедрение до скола, при котором происходит полное разделение рассматриваемого элементарного объема, разрезаемого сечения; α_τ – степенной показатель, характеризующий форму распределения сопротивлений срезу, $\alpha_\tau = 0,35$.

Опираясь на уравнения (1) и (2), применительно к резке квадратной заготовки со стороной H параллельными ножами (рис. 1б), когда $\varepsilon = y/H$, можно получить зависимость изменения силы резки от абсолютной величины смещения ножа y (начиная с момента начала контакта ножа с заготовкой)

$$P(y) = \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_n} \left(\frac{y}{\varepsilon_n \cdot H} \right)^{\alpha_\tau} \left(1 - \frac{y}{H} \right) \cdot H^2. \quad (3)$$

Учитывая данные [9] было отмечено, что для всех фасонных профилей имеют место различные условия по поперечному сечению разрезаемой заготовки, которые оказывают влияние на локальные характеристики и интегральный показатель силы в целом. В связи с этим, анализировали величину относительного внедрения ε_n , по поперечным срезам квадратной заготовки (рис. 2а, б) размерами 10x10 мм на параллельных и фасонных ножах, на лабораторных ножницах ($V = 30$ мм/с). При этом контролировали силовые параметры с помощью измерительной системы.

На представленных изображениях сечений можно видеть, что в поперечном сечении имеют место две зоны: первая – вмятие (затемненная зона на фото среза) и вторая – скол (более светлая часть). Причем вмятие ножей в металл зависит от исходной высоты сечения.

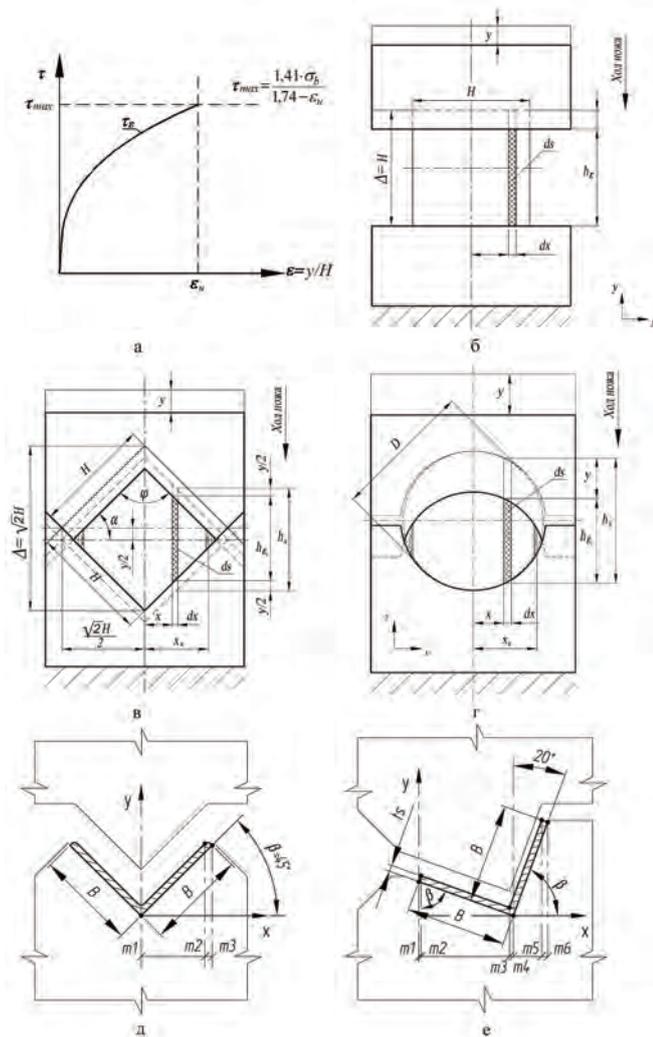


Рис. 1. Зависимость сопротивления срезу (а) и схемы к определению силы резки квадратной заготовки параллельными (б) и фасонными (в) ножами, а также фасонными ножами круглой (г) заготовки и уголка при симметричном (д) и несимметричном (е) расположении

Аналитические зависимости силы резки, применительно к простым формам поперечного сечения разрезаемой заготовки, могут быть получены в результате разбиения очага резки на конечное множество выделенных элементарных объемов (площадью ds) с последующим интегрированием. Силу резки, в общем виде, принято определять следующим обра-

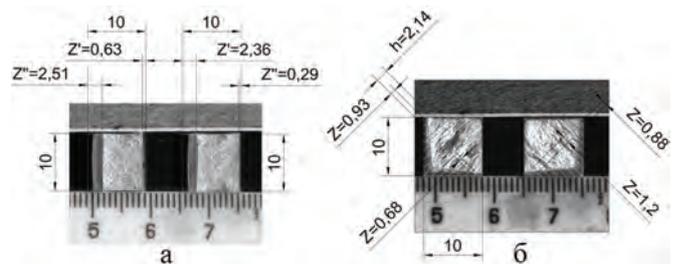


Рис. 2. Относительное вмятие ножей в металл: а – поперечное сечение квадрата 10x10 мм при резке параллельными ножами; б – поперечное сечение квадрата 10x10 мм при резке фасонными ножами на угол

Для определения относительной величины внедре-

ния до скола на изображения (рис. 2б) были нанесены параллельные линии с шагом разбиения 1 мм, что позволило определить абсолютную величину вмятия z , а затем величину относительного вмятия в зависимости от исходной высоты сечения.

В результате обработки полученных экспериментальных кривых зависимости силы резки от относительного внедрения ножей в металл и поперечных сечений срезов (рис. 2), была предложена следующая зависимость величины относительного внедрения до скола ε_{hx} для участка перерезаемого сечения с исходной высотой h_x (см. рис. 1б)

$$\varepsilon_{hx}(h_x, \alpha) = 1 - \frac{1 - e^{-A(h_x/h_{max})^{0,625}}}{1 - e^{-A}} \cdot (1 - \varepsilon_n(\cos \alpha)^2), \quad (4)$$

где A – эмпирический коэффициент, который определяется свойствами разрезаемого материала; h_{max} – толщина заготовки, при которой значения относительного внедрения до скола ε_n асимптотически приближаются к своему минимуму; α – половина угла между режущими кромками верхнего и нижнего ножей (рис. 2б), что при резке квадрата параллельными ножами составляет $\alpha = 0^\circ$, а фасонными – $\alpha = 45^\circ$.

Характер зависимости, полученной из уравнения (4), хорошо согласуется с зависимостью относительно внедрения до скола, полученной по результатам работы [9]. Таким образом, используя (1), (2) и (4) представляется возможным получить зависимость силы резки от абсолютной величины смещения ножа y по диагонали квадрата для фасонных ножей (рис. 1в)

$$P(y) = 2 \int_0^{x_k} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{hx}} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{hx}} \right)^{\alpha_r} (\sqrt{2}H - 2x - y) dx, \quad (5)$$

где ε_x – относительное внедрение ножей в заготовку для сечения, расположенного на удалении x от оси заготовки; ε_{hx} – относительное внедрение ножей до скола для сечения, расположенного на удалении x от оси заготовки; x_k – координата, где нарушается сплошность разрезаемого сечения, при суммарном смещении ножей на величину y

$$x_k = (\sqrt{2}H \cdot \varepsilon_{hx} - y) / 2\varepsilon_{hx}. \quad (6)$$

В качестве сравнения расчетных и экспериментальных данных на рис. 3 представлены данные по

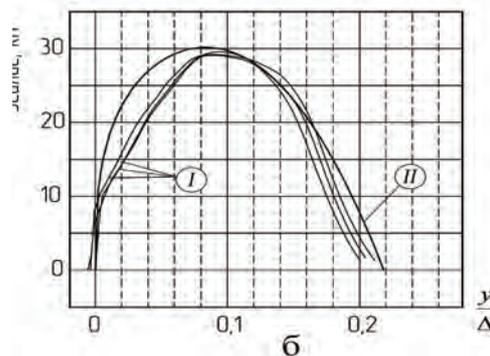
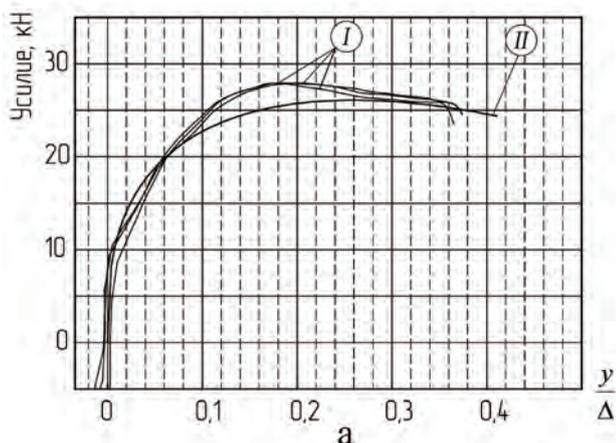


Рис. 3. Экспериментальные I и теоретические II зависимости силы резки параллельными (а) и фасонными (б) ножами заготовок сечением 10x10 мм

резке квадрата параллельными и фасонными ножами. Как можно видеть, теоретические и экспериментальные зависимости имеют высокую степень сходимости.

Для вычисления силы резки дуговыми фасонными ножами круглой по сечению заготовки, следует рассмотреть расчетную схему, представленную на рис. 1г. Зависимость силы резки от величины смещения ножа y будет иметь следующий вид

$$P(y) = 2 \int_0^{x_k} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{hx}} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{hx}} \right)^{\alpha_r} (\sqrt{D^2 - 4x^2} - y) dx, \quad (7)$$

где D – диаметр разрезаемой заготовки; x_k – координата, при которой заканчивается сплошность металла разрезаемого сечения, при суммарном смещении ножей на величину y

$$x_k = 0,5\sqrt{D^2 - (y/\varepsilon_n)^2}. \quad (8)$$

При разделении равнобокого уголка, возможны два варианта расположения (см. рис. 1):

1) уголок располагается симметрично относительно вертикальной оси (под углом 45°), как показано на рис. 1д;

2) уголок располагается несимметрично относительно вертикальной оси (под углом от 0° до 45°), как показано на рис. 1е.

Для вычисления силы резки профиля углового равнобокого фасонными ножами, при симметричном расположении относительно вертикальной оси, следует рассмотреть расчетную схему на рис. 1д, со следующими геометрическими параметрами: H – высота стенки; ts – толщина стенки.

Ввиду симметрии профиля относительно вертикальной оси можно рассматривать только половину сечения. В правой половине сечения выделяем точки, проекции которых на горизонтальную ось, отсчитываемые от начала координат вдоль оси абсцисс, при угле $\beta = 45^\circ$, следующие: $m1 = 0$, $m2 = (H - ts) / \sqrt{2}$, $m3 = H \cdot \cos \beta / \sqrt{2}$.

Зависимость силы резки от глубины внедрения y будет иметь вид

$$P(y) = 2 \left[\int_{m1}^{m3} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{hx}(h_x, \alpha)} \left(\frac{y/h_x}{\varepsilon_{hx}(h_x, \alpha)} \right)^{\alpha_r} (h_x - y) dx \right]. \quad (9)$$

При резке фасонными ножами уголка, располо-

женного несимметрично относительно вертикальной оси рассмотрим схему, представленную на рис. 1е. Характерные точки перелома функции на горизонтальной оси, отсчитываемые от начала координат следующие: $m1 = 0$; $m2 = ts \cdot \cos \beta$; $m3 = H \cdot \sin \beta$; $m4 = m2 + (H - ts) \cdot \sin \beta$; $m5 = m4 + (H - ts) \cdot \cos \beta$; $m6 = H \cdot \sin \beta + H \cdot \cos \beta$.

Зависимость силы резки от глубины внедрения y будет иметь следующий вид

$$P(y) = \int_{m1}^{m6} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{n_x}(h_x, \alpha)} \left[\left(\frac{y/h_x}{\varepsilon_{n_x}(h_x, \alpha)} \right)^{\alpha_x} (h_x - y) \right] dx. \quad (10)$$

Используя разработанную методику расчета, представляется возможным получить зависимость изменения силы резки при разделении профилей различного сечения в функции смещения ножей. Аналитическое решение интегралов (5), (7), (9) и (10) представляется весьма громоздким, поэтому для их решения целесообразно использовать численные методы интегрирования.

В рамках данной работы для решения указанных интегралов и получения зависимостей силы резки использовали прикладной математический пакет MathCad.

В качестве анализа в таблице приведены сравнительные значения максимальных значений силы резки, определенных по разработанной методике и методикам других авторов [1-4] для условий резки алюминиевого сплава АА6063 ($\sigma_s = 390$ МПа, $\varepsilon_n = 0,25$, $A = 5$). При использовании известных методик расчета максимальную силу резки определяли через площадь квадрата эквивалентного по площади сечения.

Таблица. Сравнительные значения максимальных значений силы резки

Разрезаемый профиль	Эксперимент, кН	Расчетные параметры						
		Сторона эквивалентного квадрата, мм	Целиков Королев, кН	Погрешность, %	Ллоленков [3], кН	Погрешность, %	Разработанная, кН	Погрешность, %
Квадрат 10x10 мм	27,9	10	23,21	-16,8	25,46	-8,7	26,09	-6,5
Квадрат 10x10 мм по диагонали	29,3	10	23,21	-20,8	24,53	-16,3	30,15	+2,9
Круг Ø12 мм	30,4	10,63	26,22	-13,8	28,77	-5,4	31,50	+3,6
Уголок при симметричном расположении	23,5	8,8	17,97	-23,5	19,72	-16,1	25,57	+8,8
Уголок при несимметричном расположении	23,3	8,8	17,97	-22,9	19,72	-15,4	25,48	+9,4

Обобщая полученные результаты можно утверждать, что основными преимуществами разработанной методики расчета, по сравнению с известными, является следующее:

- расширено представление о причинно-следственных связях реализации процесса разделения сложнопрофильного металлопроката на ножницах;
- учтена реальная форма разрезаемого сечения, что

позволяет повысить точность производимых расчетов интегральных величин энергосиловых параметров процесса; – установлено, что исходная толщина (высота) разрезаемого сечения выделенного элементарного объема, которое может изменяться при изменении положения разрезаемого сечения, оказывает влияние на энергосиловые параметры процесса.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- предложенные теоретические зависимости силы резки дают высокую степень сходимости с экспериментальными данными;

- предложенная методика расчета позволяет уточнить величину максимальной силы резки и расширить представление о разделительных операциях при резке заготовок в холодном состоянии.

Результаты работы могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров процесса резки фасонных профилей на ножницах, а также при дальнейших исследованиях разделительных операций.

Библиографический список

1. Прокатные станы: учебник для вузов / А.И. Целиков, В.В. Смирнов. – М.: Металлургиздат, 1958. – 432 с.
2. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1985. – 375 с.
3. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів. Навч. посіб. / Ф.К. Іванченко, В.М. Гребеник, В.І. Ширяєв – К.: Вища школа. - 1995. – 455 с.
4. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов / Н.Д. Лукашин, Л.С. Кохан, А.М. Якушев – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 456 с.
5. Развитие и совершенствование способов и механических схем резки сортового проката / В.И. Трусковский, Р.А. Закиров // Наука и технологии. Избр. тр. Российской школы. Серия «Технологии и машины обработки давлением». – М.: РАН, 2005. – С. 129–133.
6. Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб / В.И. Трусковский, В.Г. Шеркунов // Металлург. - 2012. – № 11. – С. 63–66.
7. Исследование энергосиловых параметров процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / А.В. Сатонин, П.В. Боровик, П.А. Петров, С.М. Стриченко // Сб. науч. тр. Донбасского ГТУ. Вып. 35. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – 360 с. – С. 131–137.
8. Боровик П.В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах: дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук, спец. 05.03.05. – Краматорск, 2008. – 225 с.
9. К расчету энергосиловых параметров процесса резания листового металлопроката / В.Д. Нотченко, А.В. Сатонин, А.Н. Бойденко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 6. – С. 78.

Поступила 28.07.2013