

УДК 621.967.2

П. В. БОРОВИК, М. Е. СЕЛЕЗНЕВ

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ РЕЗКИ НА СДВОЕННЫХ КРОМКООБРЕЗНЫХ НОЖНИЦАХ С КАТЯЩИМСЯ РЕЗОМ

Разработана трехмерная конечно-элементная математическая модель симулирующая обрезку боковых кромок полос на ножницах с катящимся резом. На примере сдвоенных кромкообрезных ножниц стана 2800 ПАО «Ашинский металлургический завод» (Россия) конструкции НКМЗ рассмотрен процесс разделения четырех марок стали 45, 75, 28Х3СНМВФА и 18Х2Н4ВА. Указывается, что при расчете максимальной толщины разрезаемых листов недостаточно учитывать только предел прочности разрезаемой стали. Сделаны выводы, что предложенная модель будет способствовать углублению представления о процессе и расширению сортамента разрезаемых листов, а также позволит снизить вероятность перегрузок оборудования.

Ключевые слова: ножницы с катящимся резом, продольная резка, разделение, лист, конечно-элементная модель.

Введение. Разделительные операции широко применяются в прокатном производстве и определяют качество и себестоимость металлопродукции. В частности, при производстве листов и полос применяют продольные разделительные операции, направленные на обрезку боковых кромок и роспуск на полосы меньшей ширины [1, 2].

Анализ состояния вопроса. Процесс продольной резки толстых листов в настоящее время преимущественно реализуется на дисковых ножницах, либо на ножницах с катящимся резом [1].

Основным недостатком в работе дисковых ножниц является вероятность возникновения дефекта «серповидность», который достаточно эффективно решается методом установки системы подающих роликов, которые сдерживают движение листа в направлении перпендикулярном его движению. Однако дисковые ножницы позволяют осуществить процесс обрезки боковых кромок на всей длине раската с одной установки, что не представляется возможным сделать на ножницах, работающих по принципу катящегося, в силу ограниченной длины ножа. В этом случае также используют систему подающих роликов, чтобы минимизировать вероятность возникновения уступов в областях перехода от одного реза к другому.

Кроме того, резка дисковыми ножами еще имеет и ограничение по толщине разрезаемых раскатов в холодном состоянии. Как известно [3], расширить сортамент возможно при условии реализации процесса в горячем состоянии.

Очевидно, что применение катящегося реза более предпочтительно, даже при условии того, процесс реализуется в несколько шагов, путем разделения раската на большей части длины ножа и частичного надреза на заключительном этапе с последующим перемещением листа на длину разделенного участка, и повторением процесса. Особенно, учитывая, тот факт, что на широкополосных станах в ряде случаев могут производить роспуск полосы на листы меньшей ширины.

В то же время существующие на сегодняшний день методики расчета далеко не всегда позволяют рационально определить сортамент разрезаемой

продукции, что в большинстве случаев не позволяет в полной мере использовать их технологические возможности, а в ряде, даже приводит к некоторым перегрузкам.

В настоящее время, благодаря росту возможностей современной вычислительной техники и успешному развитию подходов теоретических исследований, широко используют моделирование различных технологических процессов обработки давлением с целью их более глубокого изучения и совершенствования.

Поэтому, для расширения представления о протекании процесса катящегося реза целесообразно использовать современные теоретические подходы и методы, среди которых особое место занимает метод конечных элементов [4, 5].

Цель работы. В качестве цели данной работы ставилась задача на базе метода конечных элементов разработать математическую трехмерную модель процесса катящегося реза и получить представление о технологических возможностях ножниц.

Методика исследований. Для достижения указанной цели проводились теоретические исследования на базе конечно-элементного программного комплекса ABAQUS.

При разработке математической модели процесса продольной резки дугвыми ножами на ножницах с катящимся резом за основу была взята кинематическая схема механизма резания сдвоенных кромкообрезных ножниц (СКОН) стана 2800 ПАО «Ашинский металлургический завод» (Россия) конструкции НКМЗ (рис. 1,а).

Сдвоенные кромкообрезные ножницы с катящимся резом состоят из подвижных и неподвижных ножниц, установленных друг против друга на опорных балках механизма перемещения. Опорные балки закреплены на фундаменте.

Неподвижные ножницы закреплены жестко на опорных балках, а подвижные крепятся с помощью гидropружинных зажимов. Перемещение подвижных ножниц осуществляется с помощью гидропривода механизма перемещения, при этом ножницы освобождаются от фиксации гидropружинных зажимов.

Подвижные и неподвижные ножницы по конструкции аналогичны, но выполнены в зеркальном исполнении.

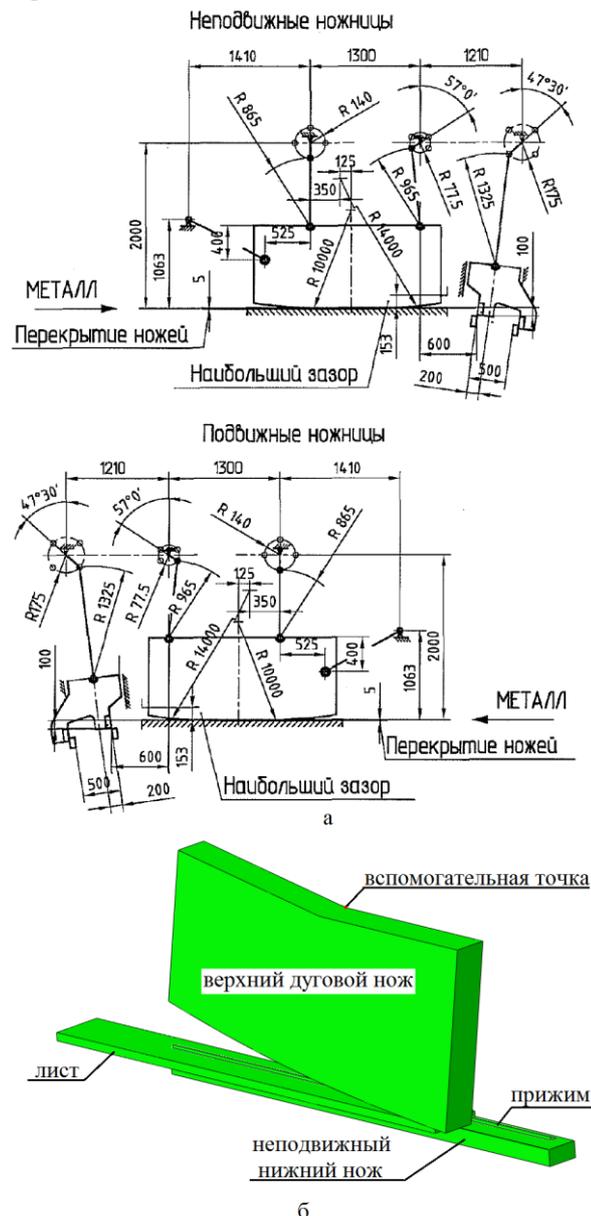


Рис. 1 – СКОН стана 2800 ПАО «Ашинский металлургический завод» (Россия) конструкции НКМЗ: а – кинематическая схема механизмов резания, б – общий вид модели процесса обрезки кромок дуговым ножом на ножницах с катящимся резом

В конструкции ножниц предусмотрены два механизма резки, работающие от одного привода. Один механизм осуществляет продольную резку кромки, а второй ее поперечную (скрапную) резку на мерные длины. При этом следует указать, что скрапных реза два и осуществляются они по очереди на завершающем этапе продольного реза.

В рамках данной работы рассматривали только продольную резку кромки, которая осуществляется по принципу катящегося реза с дуговым ножом и переменным радиусом. При этом начало реза осуществляет часть ножа радиусом 14 м, а завершение реза – радиусом 10 м.

Собственно конечно-элементная модель (рис. 1, б) состоит из трех абсолютно жестких недеформируемых тел – прижим, верхний (дуговой) и нижний неподвижный ножи, а также деформируемого бруса, моделирующего лист и обрезаемую кромку.

Прижим, верхний (дуговой) и нижний неподвижный ножи описываются как дискретные недеформируемые поверхности, состоящие из жестких трехмерных четырехузловых билинейных четырехугольных элементов (R3D4).

При описании деформируемого бруса строилась сетка из изопараметрических шестигранных восьмиузловых линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования (C3D8R), имеющих свойства сплошной деформируемой среды. Структура сетки неравномерная, сгущающаяся в области реза (рис. 2).

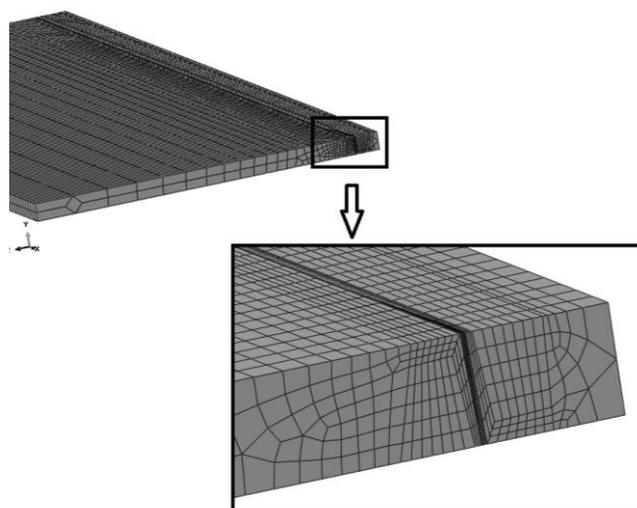


Рис. 2 – Исходная структура сетки

Трение между контактными поверхностями моделирует закон трения Кулона. Разрушение материала моделировали методом исключения элементов из расчета, после исчерпания ресурса пластичности в соответствии с диаграммой пластичности.

При построении кривых текучести учет влияния скорости деформации производился по известной зависимости [6]:

$$\sigma_u = \sigma_{cm} K_v, \quad (1)$$

где σ_{cm} – сопротивление деформации при статических испытаниях;

K_v – скоростной коэффициент.

Сопротивление деформации при статических испытаниях определялось из уравнения, предложенного в работе [7]:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{0,2} (\bar{\epsilon}_p / 0,002)^{n_0}, \quad (2)$$

где $\bar{\epsilon}_p$ – степень истинной пластической деформации;

m_0 – показатель упрочнения, который зависит от соотношения предела прочности к пределу текучести $\sigma_b/\sigma_{0,2}$.

Для определения показателя упрочнения, по данным работы [7], была получена следующая аппроксимация:

$$m_0 = 0,008 + 0,2515 \ln(\sigma_b/\sigma_{0,2})^{0,818} \quad (3)$$

Скоростной коэффициент, определялся из выражения [6]:

$$K_v = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_{cm})^{m_1}, \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon}$ – текущая скорость деформации;

$\dot{\epsilon}_{cm}$ – скорость деформации при статических испытаниях;

m_1 – степенной показатель, определяемый механическими свойствами материала [6].

В ходе моделирования в качестве разрезаемого материала были рассмотрены четыре марки стали 45, 75, 28Х3СНМВФА и 18Х2Н4ВА, характеристики которых и толщина листов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика материала листов и условия реализации процесса продольной резки боковых кромок на СКОНах

№ п/п	Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ	Толщина листа, мм
1	45	347	660	0,197	50
2	75	574	989	0,108	40
3	28Х3СНМВФА	860	1000	0,09	40
4	18Х2Н4ВА	910	1128	0,09	27

Кроме параметров, указанных в таблице, был ряд общих для всех случаев параметров, а именно ширина отрезаемой кромки – 150 мм; длина моделируемой части – 2600 мм; перемещение листа

после первого и каждого последующего реза – 1100 мм. Скорость вращения кривошипов назначалась из условия номинальной частоты вращения двигателя 744 об/мин, что с учетом передаточного числа привода 38,58 составило $2,0195 \text{ c}^{-1}$.

Для осуществления процесса резки в данной модели, по аналогии с реальной конструкцией ножниц, движения вспомогательной точки верхнего (дугового) ножа сообщалось движение по определенной траектории, а также вращение в плоскости движения. Траектория движения вспомогательной точки, а также ее вращение были рассчитаны на базе известных методик [8] по расчету кинематических параметров работы ножниц.

В качестве начального положения кривошипов, с целью минимизации холостого хода модели, был выбран угол поворота кривошипов от «нулевого» (как показано на рис. 1) положения на величину 205° . Так на рис. 3 представлены расчетная траектория движения вспомогательной точки (рис. 3, а) и угол поворота ножа в плоскости реза (рис. 3, б).

Остальные недеформируемые элементы модели – нижний нож и прижим оставались неподвижными.

Результаты моделирования. На рисунке 4 в качестве примера для стали 45 при обрезке боковых кромок листа толщиной 50 мм, представлены несколько положений процесса обрезки кромки дуговым ножом.

Собственно процесс начинается в исходном положении ножа (см. рис. 4, а). После поворота эксцентриков на угол 156° завершается этап внедрения дугового ножа в лист (см. рис. 4, б). Затем, после полного выхода ножа из контакта с листом в период холостого движения дугового ножа осуществлялось перемещение листа с надрезанной кромкой на 1100 мм, что соответствует повороту кривошипов на угол 347° (см. рис. 4, в).

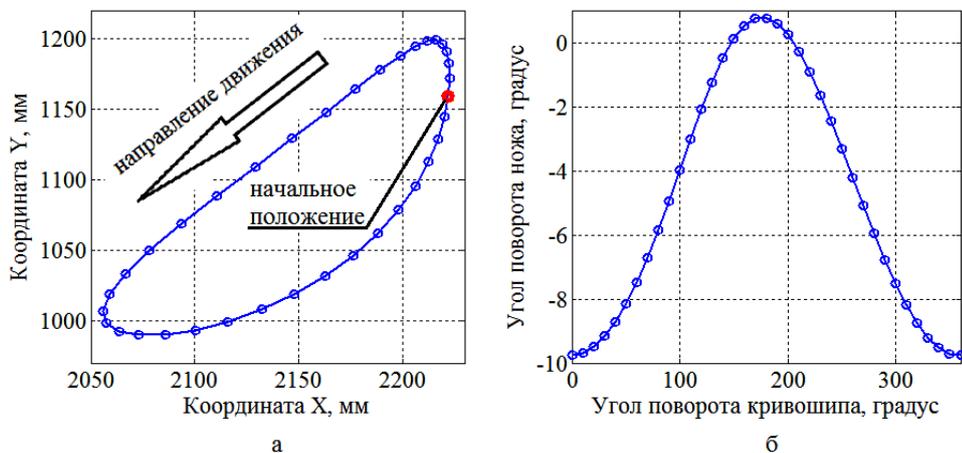


Рис. 3 – Расчетная траектория движения: а – вспомогательной точки; б – угол поворота ножа в плоскости движения с дискретным шагом поворота кривошипов 10°

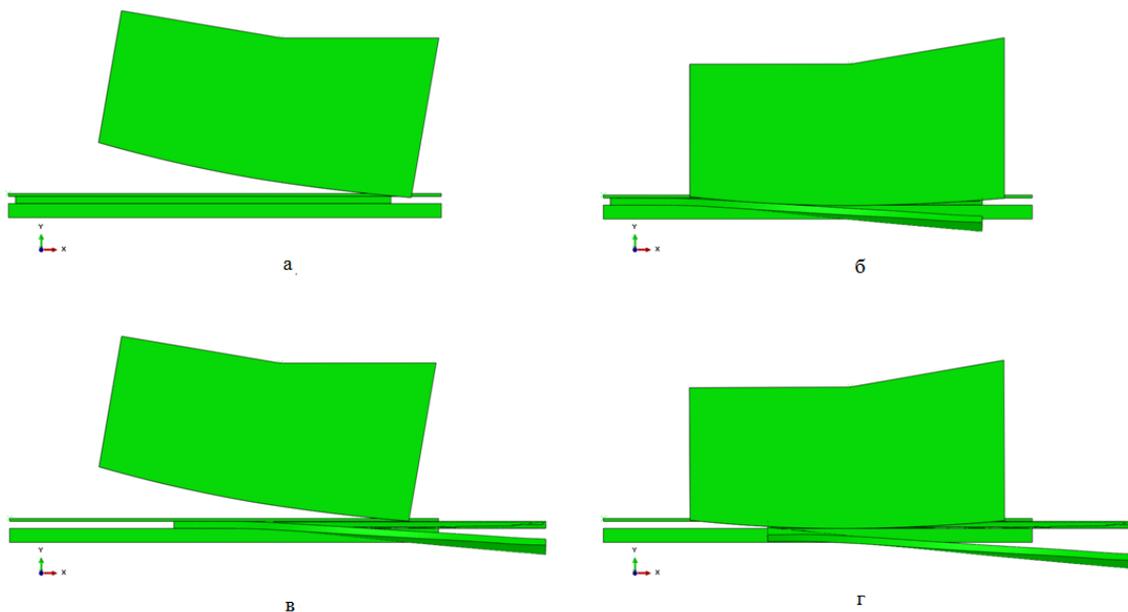


Рис. 4 – Общий вид модели на примере стали 45 для различных этапов процесса: а – начальное положение (эксцентрики повернуты на 205° относительно «нулевого» положения (см. рис. 3, а)); б – завершение первого надреза на 1,40 с (поворот кривошипов 162°); в – новое положение листа после смещения на 3,05 с (поворот кривошипов 353°); г – полное отделение кромки от листа на 4,5 с (поворот кривошипов 520°)

На следующем цикле движения ножа реализовывалось полное отделение кромки, что в данных условиях соответствовало углу поворота кривошипов на 520° (см. рис. 4, г).

На рисунке 5, в качестве примера также для стали 45 при обрезке боковых кромок листа толщиной 50 мм, представлено НДС листа и кромки на 0,7 с этапа установившегося процесса (см. рис. 5, а) и по завершению первого этапа внедрения на 1,4 с (см. рис. 5, б), а также показана зависимость силы резки в ходе первого этапа (см. рис. 5, в). Подобные результаты моделирования были получены и для других условий (см. табл. 1).

Полученные результаты моделирования показали, что при определении предельной толщины разрезаемого металла на ножницах недостаточно учитывать только предел прочности разрезаемой стали и толщину листа. Так, при прочих равных условиях наибольшее значение силы резки было получено для стали 75 при толщине листа 40 мм, которое на $\approx 3\%$ превысило силу резки для стали 45 при толщине 50 мм

В то же время при резке стали 28ХЗСНМВФА, имеющей несколько более высокий предел прочности по отношению к стали 75, сила резки была ниже на $\approx 9\%$. При этом следует отметить, что толщина

данных листов была равна 40 мм. Кроме того, при резке стали 18Х2Н4ВА толщиной 27 мм максимальная сила, несмотря на большее значение предела прочности, была еще ниже.

Обобщая полученные результаты можно утверждать, что при расчете максимальной толщины разрезаемых листов недостаточно учитывать только предел прочности разрезаемой стали.

При этом можно отметить, что при разделении холодного металла на ножницах с катящимся резом энергосиловые параметры процесса зависят от поведения материала в ходе резки, которое может существенно отличаться при близких значениях предела прочности, но различных значениях предела текучести. Очевидно, что данное явление оказывает слабое влияние при резке параллельными ножами, но более существенно сказывается на энергосиловых параметрах процессов резки наклонными, дисковыми и дуговыми ножами. Кроме того, данное влияние может существенно меняться при изменении величины относительно удлинения материала при растяжении, поскольку оно в совокупности с пределом прочности и пределом текучести материала может иметь неоднозначное влияние на относительное внедрение ножей в металл до скола.

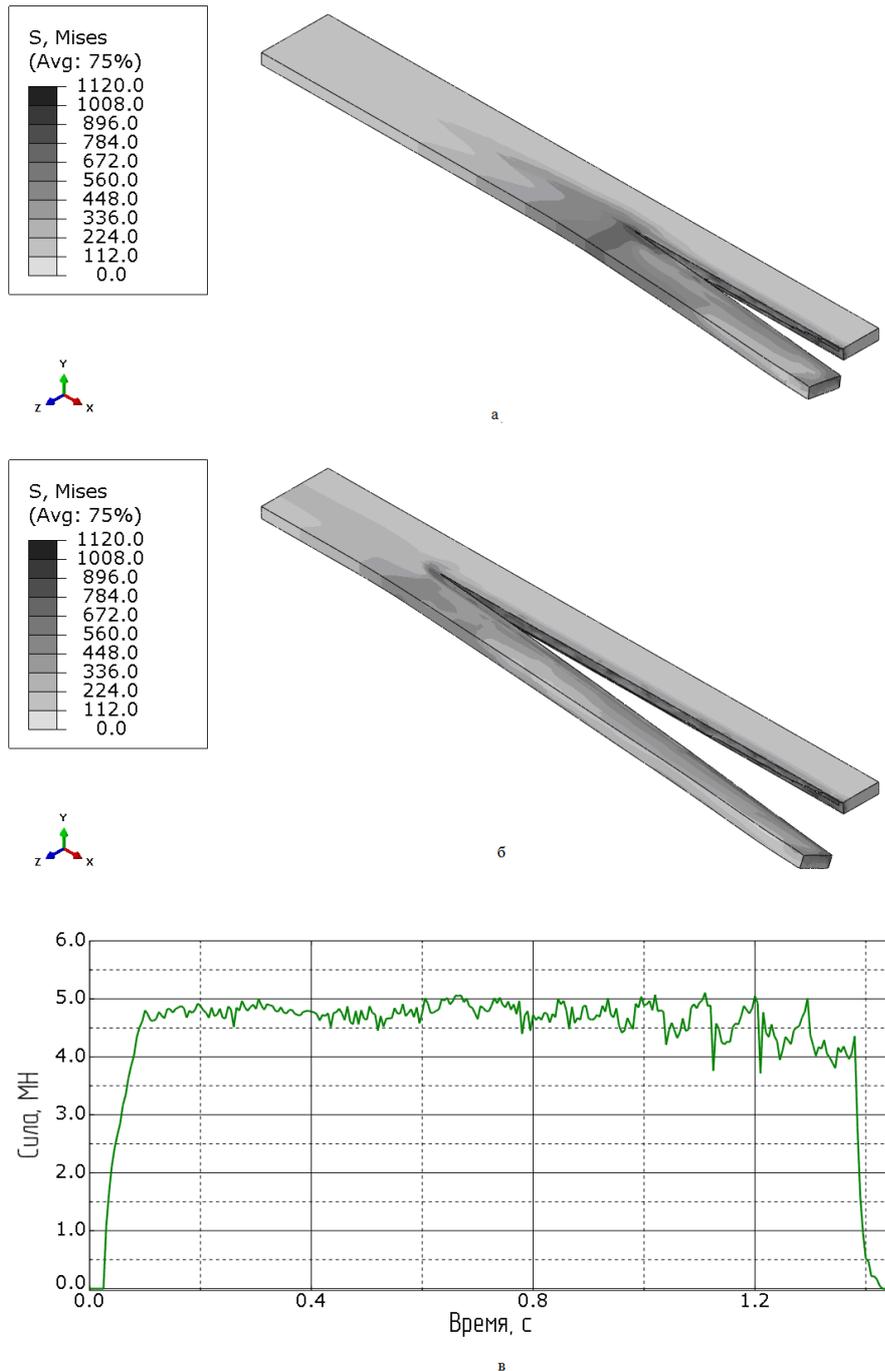


Рис. 5 – НДС листа и кромки из стали 45: а – при резке дуговым ножом на 0,7 с в установившемся состоянии процесса, б – на 1,4 с после завершения первого этапа и в – соответствующая первому этапу зависимость силы резки

Разработка предложенных моделей будет способствовать расширению представления о процессе резки дуговыми ножами, а также позволит повысить точность и научную обоснованность при расчете максимальных толщин листов, допускаемых к порезке. Это в большинстве случаев будет способствовать расширению сортамента разрезаемых листов, а в ряде случаев позволит существенно снизить вероятность перегрузок оборудования.

Выводы. По результатам работы можно отметить следующее:

– неотъемлемой составляющей листопркатного производства являются разделительные операции продольной резки;

– рост возможностей современной вычислительной техники и развитие подходов теоретических исследований, позволяют более глубоко изучать разделительные операции в прокатном производстве;

– применение метода конечных при разработке математических моделей процесса продольной резки дуговым ножом на ножницах с катящимся резом позволяет повысить

точность производимых расчетов и повысить научную обоснованность при принятии технологических решений;

– при расчете максимальной толщины разрезаемых листов недостаточно учитывать только предел прочности разрезаемой стали, поскольку при разделении холодного металла его поведение зависит не только от предела прочности, но и от предела текучести, а также относительного удлинения.

Результаты работы могут быть полезны при исследовании процесса разделения дуговыми ножами на ножницах с катящимся резом, а также при разработке практических рекомендаций по их эксплуатации.

Список литературы: 1. Лукашин Н. Д. 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. 2. Ginzburg V. B. Flat-rolled steel processes: Advanced Technologies / V. B. Ginzburg. – CRC Press, 2009. – 372 p. 3. 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 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225 с. 4. Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 p. 5. Боровик П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. Посіб. / П. В. Боровик. – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – 170 с. 6. Ушаков М. В. Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании металлов / М. В. Ушаков, С. Ю. Ильяхин, И. А. Воробьев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. Ч. 2. – Тула : ТулГУ, 2010 – С. 89–93. 7. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник / Д. А. Гохфельд, Л. Б. Гецов, К. М. Кононов и др. – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 408 с. 8. Численное математическое моделирование процесса резания

листового металлопроката на ножницах с дугообразным ножом / В. Д. Нотченко, А. Н. Бойденко, Е. А. Емченко и др. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2001. – С. 454–457.

Bibliography (transliterated): 1. Lukashin N. D. Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlja vuzov / N. D. Lukashin, L. S. Kohan, A. M. Jakushev – Moscow: IKC «Akademkniga», 2003. – 456 p. 2. Ginzburg V. B. Flat-rolled steel processes: Advanced Technologies. CRC Press, 2009. Print. 3. Borovik P. V. Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovanija processa prodol'noj rezki tolstykh gorjacekatanykh listov na diskovykh nozhnicah : dis. na soiskanie uchen. stepeni kand. tehn. nauk, spec. 05.03.05 / Borovik Pavel Vladimirovich. – Kramatorsk, 2008. – 225 p. 4. Liu G. R., and Quek S. S. The Finite Element Method: A Practical Course, 2003. Print. 5. Borovik P. V. Teoretychni doslidzhennja protsesiv obrobky metaliv tyskom na osnovi metodu skinchenykh elementiv: Navch. Posib. / P. V. Borovik. – Alchevs'k: DonDTU, 2012. – 170 p. 6. Ushakov M. V. Uchet vlijanija skorosti deformacii i temperatury na processy, proishodjashhie v zone pervichnoj deformacii pri rezanii metallov / M. V. Ushakov, S. Ju. Il'juhina, I. A. Vorob'ev // Izvestija TulGU. Tehniceskie nauki. Vyp. 4. Ch. 2. – Tula : TulGU, 2010 – P. 89–93. 7. Mehaniceskie svojtva stalej i splavov pri nestacionarnom nagruzhenii. Spravochnik / D. A. Gohfel'd, L. B. Gecov, K. M. Kononov i dr. – Ekaterinburg : UrO RAN, 1996. – 408 p. 8. Chislennoe matematicheskoe modelirovanie processa rezanija listovogo metalloprokata na nozhnicah s dugoobraznym nozhom / V. D. Notchenko, A. N. Bojdenko, E. A. Emchenko i dr. // Udoskalennja protsesiv i obladdannja obrobky tyskom v metalurhiji i mashynobuduvanni : temat. zb. nauk. pr. – Kramators'k – P. 454–457.

Поступила (received) 20.10.2015

Сведения об авторах / About the Authors

Боровик Павел Владимирович – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск; тел.: (050) 108-89-08; e-mail: borovikpv@mail.ru.

Borovik Pavel Vladimirovich – candidate of technical Sciences (*Ph. D.*), *Docent*, doctoral candidate of the department «Automated metal forming process and machinery» the Donbass state engineering Academy, Kramatorsk; tel: (050) 108-89-08; e-mail: borovikpv@mail.ru.

Селезнев Максим Евгеньевич – аспирант кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск; тел.: (050) 804-44-21; e-mail: seleznevme@mail.ru.

Seleznev Maxim Evgen'evich – postgraduate student of the department «Automated metal forming process and machinery» the Donbass state engineering Academy, Kramatorsk; tel: (050) 804-44-21; e-mail: seleznevme@mail.ru.