

УДК 621.967.1

Боровик П. В.

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ КВАДРАТНОГО ПРОФИЛЯ НА НОЖНИЦАХ

Задачи расширения технологических возможностей уже эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования в современных условиях развития металлургического машиностроения являются весьма актуальными. Их решение представляется возможным за счет повышения точности производимых конструкторских расчетов и увеличения степени научной обоснованности при принятии проектных и технологических решений.

Существующие технологические схемы производства сортового металлопроката включают операции поперечного разделения на ножницах [1–4]. Реалии таковы, что одними из основных задач при этом являются повышение качества готового металлопроката и расширение технологических возможностей ножниц, а это способствует повышению интереса в данной области [5, 6].

Главным технологическим параметром, определяющим конструкцию ножниц, производительность и надежность их эксплуатации, а также сортамент разрезаемых профилей является сила резки. Классические методы А. И. Целикова, В. В. Носаля и А. А. Королева [1, 2] по определению максимальной силы резки представляются наименее трудоемкими 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. В то же время экспериментальные исследования [3, 7] в этой области показывают, что даже при разделении заготовок равного квадратного сечения в условиях резки параллельными и фасонными (по диагонали) ножами наблюдается различие в максимальной величине силы резки. В работе [3] представлена методика расчета для условий горячей резки квадрата по диагонали, но вопрос разделения на ножницах профилей более сложного сечения остается открытым.

Кроме того, классические методы расчета силы резки [1–4] параллельными ножами используют эмпирические коэффициенты, учитывающие затупление ножей и влияние бокового зазора, при учете которых величина силы изменяется в широком диапазоне.

Очевидно, что столь существенное увеличение силы должно иметь и другие причины, прежде всего связанные с механическими свойствами разрезаемых сталей и условиями реализации процесса. Таким образом, существует необходимость проведения более широкого спектра научных исследований направленных на развитие и уточнение методов расчета энергосиловых параметров процесса резки сортовых профилей на ножницах, в том числе с использованием современных теоретических подходов и методов, среди которых особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ) [8].

Целью данной работы является расширение представления о протекании процесса разделения квадратных профилей на ножницах путем анализа напряженно-деформированного состояния металла в очаге резки с учетом технологических особенностей реализации процесса.

Для достижения указанной цели проводились теоретические исследования на базе программного комплекса ABAQUS.

В результате были разработаны трехмерные математические модели (рис. 1), описывающие процесс разделения квадратного профиля параллельными (рис. 1, а) и фасонными (рис. 1, б) ножами. Каждая состоит из двух абсолютно жестких недеформируемых тел – верхний и нижний ножи, а также деформируемого бруса – разделяемый профиль квадратного сечения. Кроме того, для учета упругой деформации станины в модель введен упругий элемент, а для исключения значительных динамических колебаний – вязкий демпфер.

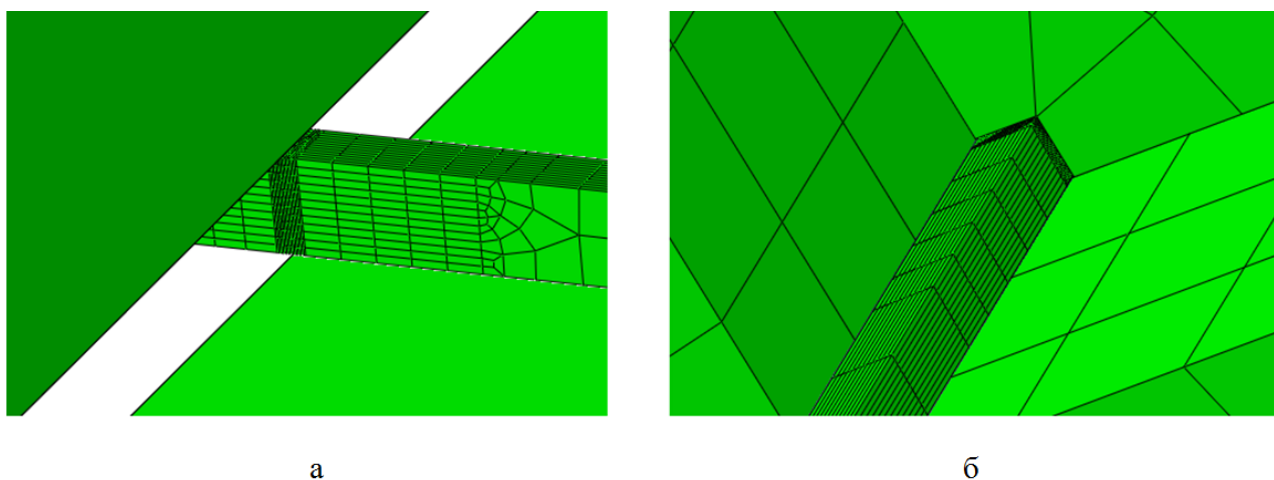


Рис. 1. Общий вид моделей разделения квадратного профиля:  
а – параллельными; б – фасонными ножами

При этом, по аналогии с реальной конструкцией ножниц, движение сообщается нижнему ножу, тогда как верхний нож остается неподвижным.

Инструменты моделировались как дискретные недеформируемые поверхности и представляют собой сетку, состоящую из трехмерных четырехузловых элементов (R3D4). Сетка деформируемого бруса состоит из изопараметрических шестигранных восьмиузловых линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования (C3D8R), имеющих свойства сплошной деформируемой среды. При этом сетка имеет сгущение в очаге резки.

Учитывая, что процесс разделения металла сопровождается большими пластическими деформациями, в ходе математического моделирования использовалась процедура адаптации сетки в формулировке Лагранжа – Эйлера [9].

В основу модели контактного взаимодействия между заготовкой и инструментами был положен закон трения Амонтона-Кулона, как отношение напряжения трения (касательного) к внешнему контактному давлению между контактирующими телами.

Разрушение материала моделировалось методом исключения элементов из расчета, после исчерпания ресурса пластичности в соответствии с диаграммой пластичности [9].

Сопrotивление металла деформированию, с учетом скорости деформации, определяли по известной зависимости [10]:

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

где  $\sigma_{cm}$  – сопротивление деформации при статических испытаниях;

$K_v$  – скоростной коэффициент.

При определении сопротивления деформации при статических испытаниях использовали аппроксимацию, предложенную в работе [11]:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{0.2} (\bar{\varepsilon}_p / 0.002)^{m_0}, \quad (2)$$

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

$m_0$  – показатель упрочнения:

$$m_0 = \begin{cases} \frac{\ln(\sigma_b / \sigma_{0.2}) + 0.058}{3.44} & \text{при } \sigma_b / \sigma_{0.2} \leq 1.32; \\ \frac{\ln(\sigma_b / \sigma_{0.2}) + 0.216}{4.78} & \text{при } \sigma_b / \sigma_{0.2} > 1.32. \end{cases} \quad (3)$$

Скоростной коэффициент, определяли из выражения [10]:

$$K_v = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{cm}} \right)^{m_1}, \quad (4)$$

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

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

$m_1$  – степенной показатель, определяемый механическими свойствами материала.

Результаты моделирования сравнивали с результатами лабораторных экспериментальных исследований, которые проводились в условиях кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск) на лабораторной установке кривошипно-шатунных ножниц с параллельным расположением суппортов, в которые устанавливали ножи соответствующие условиям реализации процесса разделения. В качестве исследуемых образцов использовали квадратный профиль 10×10 мм, изготовленный из алюминиевого сплава АА6066 со следующими механическими свойствами:  $\sigma_{0,2} = 360$  МПа,  $\sigma_b = 395$  МПа,  $m_1 = 0,02$ . При моделировании кривые текучести материала строили, используя алгоритм (1)–(4).

Скорость резки (движения нижнего ножа) в условиях моделирования полностью совпадала с условиями лабораторной реализации процесса и составила 30 мм/с.

На рис. 2 можно видеть общий вид квадратного профиля полученного по результатам моделирования (рис. 2, а) и в результате резки на ножницах (рис. 2, б), соответственно при использовании параллельного и фасонного ножей. Как можно видеть из представленных изображений, геометрия профиля, а также формирование поверхности среза, по результатам моделирования достаточно хорошо согласуются с образцами полученными экспериментально.

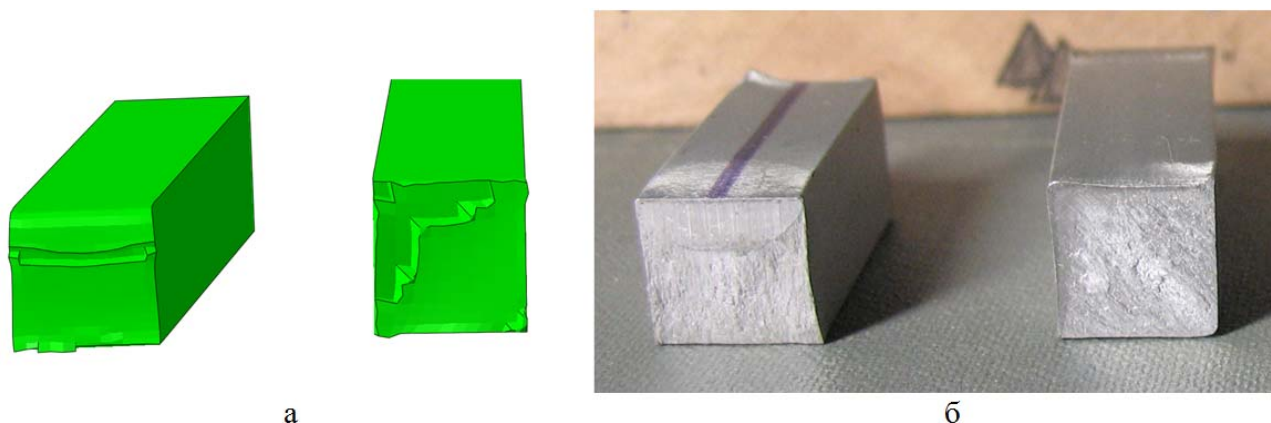


Рис. 2. Общий вид квадратного профиля полученного по результатам моделирования (а) и в результате резки на ножницах (б), соответственно при использовании параллельного (левые части изображений) и фасонного (правые части изображений) ножей

Касательно энергосиловых параметров рассматриваемых условий реализации процесса на рис. 3 представлены сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей силы в ходе резки при использовании параллельного и фасонного ножей. При этом можно видеть, что представленные зависимости достаточно хорошо согласуются. Статистическая обработка показала величину коэффициента корреляции расчетных и экспериментальных данных на уровне 0,8737–0,9598 при резке параллельными ножами и 0,9082–0,9778 фасонными.

Учитывая достаточно высокую степень сходимости расчетных и экспериментальных данных, а также тот факт, что объем информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) материала в процессе резки, по результатам моделирования МКЭ значительно обширнее по сравнению с экспериментальными данными, то представляется возможным расширить представления о протекании процесса.

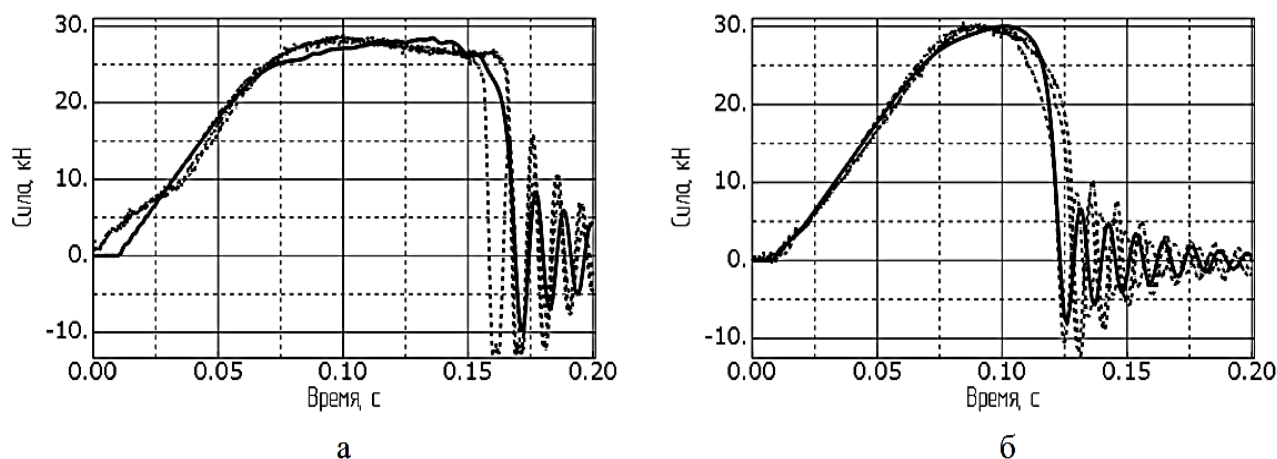


Рис. 3. Расчетные (—) и экспериментальные (- - -) зависимости силы в ходе резки: а – при использовании параллельного ножа; б – при использовании фасонного ножа

В ходе последующей обработки результатов математического моделирования МКЭ определяли усредненные показатели НДС исследуемых параметров для всех разрушаемых элементов. При этом разрушаемые элементы объединяли в столбцы и определяли усредненные значения. Это позволяет рассматривать разрезаемое сечение по аналогии с конечно-разностной формой статического равновесия, как сечение, состоящее из набора отдельно выделенных элементарных объемов с постоянной (параллельные ножи) или переменной (фасонные ножи) высотой по ширине сечения. Такой подход, на данном этапе, позволяет выявить ряд особенностей характерных процессу резки на ножницах квадратных профилей, а в дальнейшем перейти к рассмотрению более простых (по отношению к МКЭ) одномерных математических моделей, которые способны повысить точность производимых расчетов.

В частности, по ширине сечения разрезаемого профиля (при резке фасонным ножом брали горизонтальную диагональ) были получены распределения максимальных значений интенсивности пластических деформаций (рис. 4, а), интенсивности напряжений (рис. 4, б) и показатель жесткости напряженного состояния (рис. 4, в). Последний представляет собой отношение гидростатического давления к интенсивности напряжений по Мизесу.

Как можно видеть из представленных зависимостей величина интенсивности пластических деформаций (см. рис. 4, а), соответствующих полному разрушению сечения при резке параллельными ножами увеличивается от периферии к вертикальной оси (среднее значение 1,519), а фасонными ножами имеет некий колебательный характер (что может быть следствием дискретности конечно-элементной модели) относительно некоторой средней величины (1,747).

Однако если проанализировать зависимости, представленные на рис. 3, можно отметить, что при использовании фасонных ножей большая степень пластической деформации достигается за меньший промежуток времени, а, следовательно, и при меньшем ходе ножа ( $\approx 4$  мм параллельными,  $\approx 3,5$  мм фасонными ножами), но также наблюдается некоторое (порядка 5 %) увеличение максимального значения силы резки.

В то же время при резке фасонным ножом более высокую степень деформации можно объяснить более стесненными условиями деформирования, что подтверждается величиной показателя жесткости напряженного состояния (см. рис. 4, в).

Характер изменения данного показателя также зависит от схемы реализации процесса. Так при параллельной схеме расположения ножей, полное разрушение хоть и происходит практически сразу по всему сечению, но начинается от свободных боковых поверхностей. Подтверждение этому можно видеть на рис. 2 по характерной форме зоны собственно реза, причем, как в реальных условиях, так и по результатам моделирования. Что касается схемы с фасонными ножами, то по краям наблюдается практически 4-х кратное увеличение показателя

жесткости напряженного состояния, при достаточно близких по величине степенях пластической деформации, что, при постоянном зазоре между ножами, вполне объяснимо малой высотой данных сечений и, как следствие, увеличением зазора по отношению к ним.

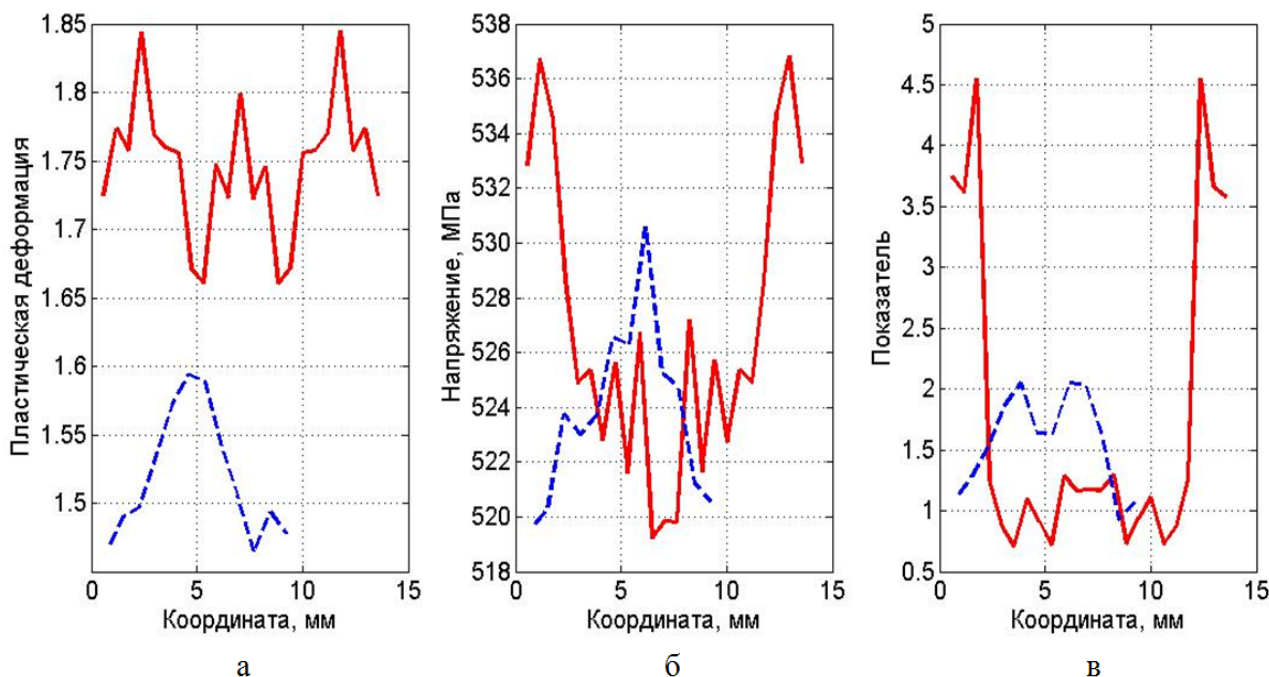


Рис. 4 – Распределения по ширине сечения максимальных значений:

а – интенсивность пластических деформаций; б – интенсивность напряжений; в – показатель жесткости напряженного вдоль горизонтальной оси при резке квадрата параллельными (---) и фасонными (—) ножами

Кроме того, можно видеть (см. рис.4, б) в средней части сечений величины максимальных напряжений достаточно близки при каждой из рассматриваемых схем, а средние показатели разнятся менее 0,6 % (параллельная схема 523,8 МПа, фасонная – 526,9 МПа). В то же время, на периферии наблюдается существенная разница в величине интенсивности напряжений.

В связи с этим, были получены распределения (рис. 5) тех же параметров вдоль горизонтальной диагонали квадрата, но при соответствующих значениях относительного внедрения ножей в металл применительно к каждому из выделенных объемов в рассматриваемом сечении.

При этом данные распределения получены только для элементов, коэффициент повреждаемости которых менее 1,0. Из представленных зависимостей можно видеть, что относительное внедрение до скола в крайних сечениях может превышать 1,0, что указывает на сингулярность данных областей разрезаемого сечения в общем представлении о процессах резки на ножницах.

Кроме того, при детальном рассмотрении представленных на рис. 6 распределений можно отметить достаточно хорошо прослеживающуюся функциональную связь между входными и выходными параметрами, прежде всего от толщины разрезаемого сечения.

Таким образом, при условии расширения базы экспериментальных исследований, а также математических моделей на базе МКЭ, представляется возможным расширить представление о процессах, протекающих в металле при разделении его на ножницах. Это позволит повысить точность методов расчета энергосиловых параметров и основных показателей качества, а также степень научной обоснованности при принятии конструкторских и технологических решений в области процессов разделения металлопроката на ножницах.

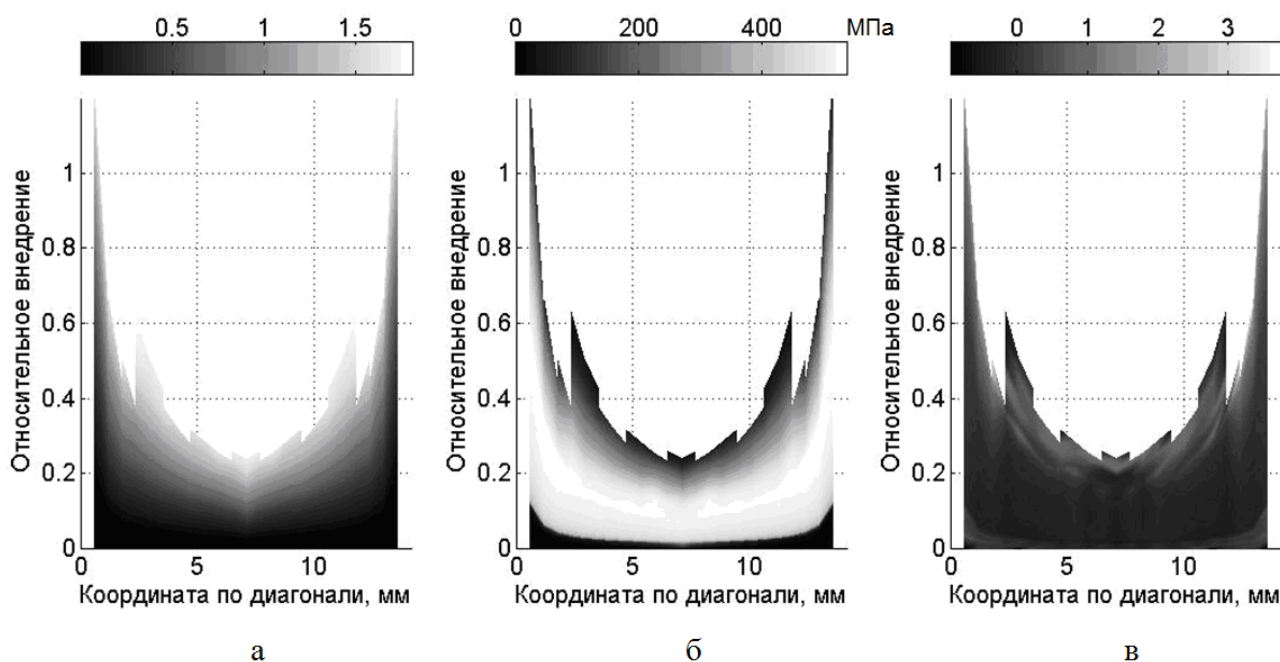


Рис. 5. Распределения интенсивности пластических деформаций (а), интенсивности напряжений (б) и показателя жесткости напряженного состояния (в) вдоль горизонтальной диагонали квадрата при соответствующих значениях относительного внедрения ножей в металл

## ВЫВОДЫ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

– различные схемы реализации процесса разделения профилей, равных по площади и геометрическим размерам, вносят существенное влияние в напряженно-деформированное состояние металла в очаге резки и, как следствие, изменяются энергосиловые показатели процесса;

– реализация схемы разделения квадратной заготовки фасонными ножами по отношению к параллельным, сопровождается более интенсивным накоплением пластических деформаций, что в совокупности с изменением показателя жесткости напряженного состояния способствует более раннему разрушению сечения при относительно небольшом увеличении силы резки;

– в условиях разделения квадратной заготовки фасонными ножами зоны, прилегающие к вершинам квадрата, расположенным на горизонтальной его диагонали, являются сингулярными, поскольку относительное внедрение до скола превышает 1,0;

– необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования с целью уточнения полученных результатов и дальнейшего расширения представления о процессах, протекающих в металле при разделении на ножницах профилей различных по форме и поперечному сечению.

Результаты работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях разделительных операций фасонных профилей на ножницах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Целиков А. И. *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* / А. А. Королев. – М. : *Металлургия*, 1985. – 375 с.
3. Иванченко Ф. К. *Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів. Навч. посіб.* / Ф. К. Иванченко, В. М. Гребеник, В. І. Ширяев – К. : *Вища шк.*, 1995. – 455 с. : ил.
4. 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. : ил.

5. Трусовский В. И. Развитие и совершенствование способов и механических схем резки сортового проката / В. И. Трусовский, Р. А. Закиров // Наука и технологии. Избр. тр. Российской школы. Серия «Технологии и машины обработки давлением». – М. : РАН, 2005. – С. 129–133.

6. Трусовский В. И. Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб / В. И. Трусовский, 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 // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – Вып. 35 – С. 131–137.

8. Liu G. R. *The Finite Element Method: A Practical Course* / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 с.

9. Боровик П. В. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением: монография / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – 299 с.

10. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

11. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник / Д. А. Гохфельд [и др.] – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 408 с.

## REFERENCES

1. Celikov A. I. *Prokatnye stany : uchebnik dlja vuzov* / A. I. Celikov, V. V. Smirnov. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 432 s.

2. Korolev A. A. *Konstrukcija i raschet mashin i mehanizmov prokatnyh stanov* / A. A. Korolev. – М. : Metallurgija, 1985. – 375 s.

3. Ivanchenko F. K. *Rozrahnok mashin i mehanizmov prokatnih cehiv. Navch. posib.* / F. K. Ivanchenko, V. M. Grebenik, V. I. Shirjaev – К. : Vishha shk., 1995. – 455 s. : il.

4. Lukashin N. D. *Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlja vuzov* / N. D. Lukashin, L. S. Kohan, A. M. Jakushev – М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. – 456 s. : il.

5. Truskovskij V. I. *Razvitie i sovershenstvovanie sposobov i mehanicheskikh shem rezki sortovogo prokata* / V. I. Truskovskij, R. A. Zakirov // *Nauka i tehnologii. Izbr. tr. Rossijskoj shkoly. Serija «Tehnologii i mashiny obrabotki davleniem»*. – М. : РАН, 2005. – С. 129–133.

6. Truskovskij V. I. *Nozhnicy dlja rezki sortovogo prokata i tolstostennyh trub* / V. I. Truskovskij, V. G. Sherkunov – *Металлург*, 2012. – № 11. – С. 63–66.

7. Issledovanie jenergosilovyh parametrov processa poperechnogo razdelenija na nozhnicah nepreryv-nolityh sortovyh zagotovok / A. V. Satonin, P. V. Borovik, P. A. Petrov, S. M. Strichenko // *Sbornik nauchnyh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. – Alchevsk : DonGTU, 2011. – Вып. 35 – С. 131–137.

8. Liu G. R. *The Finite Element Method: A Practical Course* / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 s.

9. Borovik P. V. *Novye podhody k matematičeskomu modelirovaniju tehničeskikh processov obrabotki davleniem: monografija* / P. V. Borovik, D. A. Usatjuk. – Alchevsk : DonGTU, 2011. – 299 s.

10. Storozhev M. V. *Teorija obrabotki metallov davleniem : uchebnik dlja vuzov* / M. V. Storozhev, E. A. Popov. – М. : Mashinostroenie, 1977. – 423 s.

11. *Mehanicheskie svojstva stalej i splavov pri nestacionarnom nagruženii. Spravochnik* / D. A. Gohfel'd [i dr.] – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 408 s.

Боровик П. В. – канд. техн. наук, докторант ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: [borovikpv@mail.ru](mailto:borovikpv@mail.ru)