

УДК 621.967.3:519.872

Боровик П. В.

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕЗКИ ПРОКАТА ШЕВРОННЫМИ НОЖАМИ**

Толстолистовой металлопрокат широко используется в нефтегазовой отрасли, судо-, мосто- и машиностроении. Современные тенденции таковы, что потребности в этом виде металлургической продукции остаются на достаточно высоком уровне. При этом качество готового металлопроката формируется на различных этапах и стадиях производства.

Одной из таких операций является резка металла на ножницах. В условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» успешно введен в эксплуатацию агрегат поперечной резки конструкции НКМЗ. В состав агрегата входят гидравлические ножницы с нижним резом, предназначенные для поперечного разделения листового металлопроката толщиной 5...25 мм и шириной 1000...2350 мм, с пределом прочности материала до 1000 МПа.

В данной конструкции ножниц для реализации процесса резки использован верхний шевронный нож [1], что позволяет получить ряд преимуществ, а именно, снижение силы резки, за счет наклона режущих кромок ножа на угол  $3^\circ$ , и равномерного распределения нагрузки на гидроцилиндры, за счет центрирования листа шевронным ножом.

В тоже время, практика применения шевронного ножа показала наличие дефекта в виде «галочки» (или «домик»), который формируется на отрезаемой части, расположенной под шевронным ножом (рис. 1). В основном, данный дефект не превышает требований по плоскостности готового горячекатаного листа, однако существенно портит его товарный вид и, в ряде случаев, требует дополнительной его обработки.

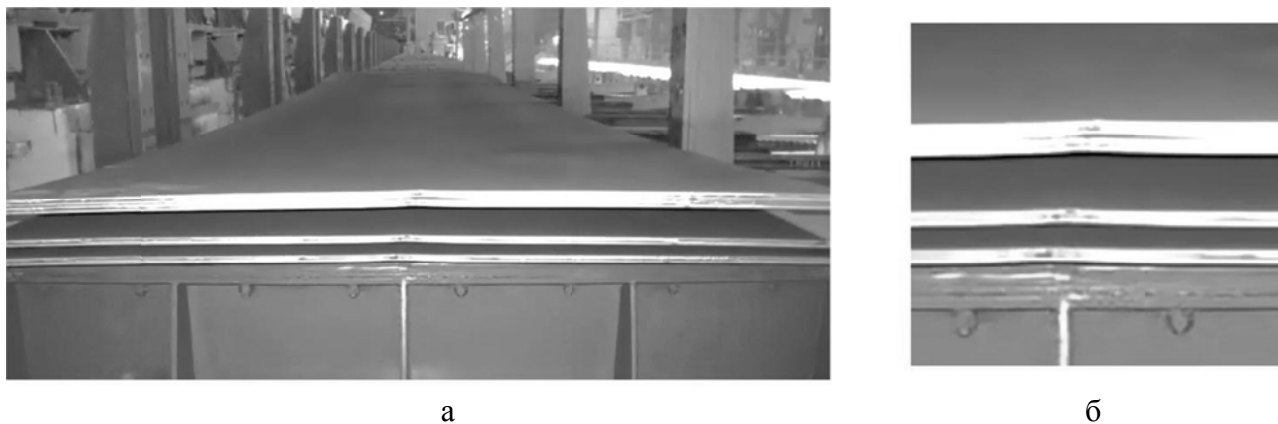


Рис. 1. Вид торцевой поверхности листов, порезанных шевронными ножами:  
а – общий вид; б – в области смыкания режущих кромок шевронного ножа

В работе [2] сотрудниками ОАО «Северсталь» предложено техническое решение, направленное на снижение данного дефекта, когда в вершине схождения режущих кромок предлагается выполнить горизонтальную площадку, длину которой определяют расчетным путем:

$$l = \frac{1,973 \cdot \sigma_t \cdot b}{\sigma_b \cdot \cos(\alpha)}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где  $\sigma_t$  – предел текучести разрезаемого материала, МПа;  
 $b$  – толщина ножедержателя с режущей пластиной, мм;

$\sigma_b$  – предел прочности разрезаемого материала, МПа;

$\alpha$  – угол наклона прямолинейных плоскостей торцевой поверхности пластины к горизонтальной плоскости.

Данное решение позволяет улучшить качество разрезаемого материала по поводу появления остаточной деформации, превышающей допуски на прямолинейность в вертикальной плоскости.

Очевидно, что устранение данного дефекта или, по крайней мере, снижение его величины является важной практической задачей. Для решения данной задачи можно использовать два подхода: практический и теоретический. При этом последний представляется весьма привлекательным, поскольку стремительный рост возможностей вычислительной техники способствует успешному развитию подходов теоретических исследований, базирующихся на численных математических моделях, в основу которых положены методы теории упругости и пластичности, а также вопросы механики разрушения.

Поэтому, для расширения представления о протекании процесса резки шевронными ножами целесообразно использовать современные теоретические подходы и методы, среди которых особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ) [3, 4].

Целью данной работы является расширение представления о протекании процесса резки толстых листов шевронными ножами и оценка влияния отдельных факторов на качество и энергосиловые параметры реза на основе метода конечных элементов.

Для достижения указанной цели проводились теоретические исследования на базе программного комплекса ABAQUS. Для чего была разработана трехмерная конечно-элементная математическая модель, описывающая процесс поперечной резки листов шевронными ножами в формулировке Лагранжа, с учетом сил тяжести.

Модель (рис. 2) представляет собой одну вторую симметричную часть и состоит из четырех абсолютно жестких недеформируемых тел – прижим, стол, верхний (шеvronный) и нижний ножи, а также деформируемого бруса, моделирующего разрезаемый лист.

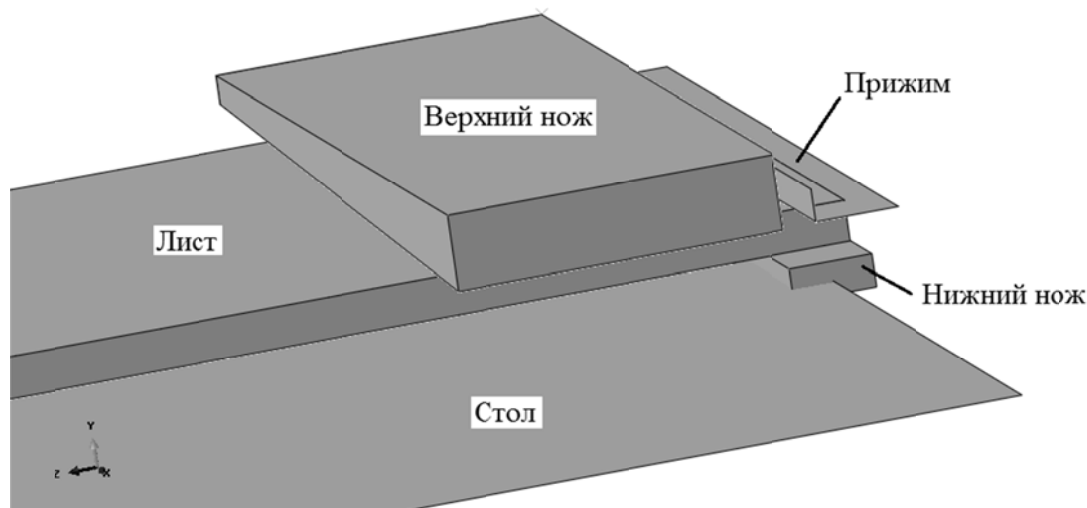


Рис. 2. Общий вид модели резки шевронным ножом

При этом по аналогии с реальной конструкцией ножниц с нижним резом движение сообщается одновременно нижнему ножу и прижиму, тогда как верхний нож и стол остаются неподвижными.

Деформируемый брус представляет собой сетку из изопараметрических шестигранных восьмиузловых линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования, имеющих свойства сплошной деформируемой среды. Структура сетки неравномерная, сгущающаяся в области реза (рис. 3).

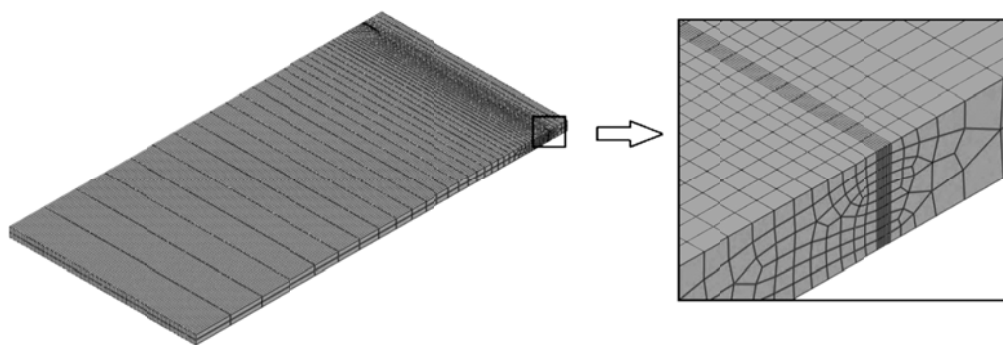


Рис. 3. Структура сетки

Трение между контактными поверхностями моделирует закон трения Кулона. При этом коэффициент трения является величиной постоянной, характеризующей связь между контактным давлением и эквивалентным касательным (контактным) напряжением.

На боковую поверхность бруса, расположенную в плоскости  $YZ$ , накладывали ограничения свойственные плоскости симметрии.

Разрушение материала моделировали методом исключения элементов из расчета, после исчерпания ресурса пластичности в соответствии с диаграммой пластичности [4].

При моделировании в качестве разрезаемого материала была выбрана сталь Ст2пс со следующими механическими свойствами [5]  $\sigma_{0.2} = 215$  МПа,  $\sigma_b = 330$  МПа.

Кривую текучести  $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon})$ , характеризующую механические свойства для выбранной марки стали, строили по известной аппроксимации [6]:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{0.2} \left( \bar{\varepsilon}_p / 0.002 \right)^{m_0},$$

где  $m_0$  – показатель упрочнения:

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

На первом этапе исследования были произведены расчеты со следующими исходными данными: толщина разрезаемого листа – 5, 15 и 25 мм; ширина разрезаемого листа – 1000 мм; скорость резки – 70 мм/с; угол наклона режущих кромок ножа – 3°.

В ходе моделирования можно выделить следующие стадии:

- собственно рез;
- падение отрезанной части на стол;
- затухающие колебания листа на столе.

В качестве примера, на рис. 4, а показана стадия резки, а на рис. 4, б – конечная форма торцевого профиля отрезанной части, после полного затухания колебаний, для листа толщиной 25 мм.

По результатам моделирования были получены зависимости силы резки (рис. 5, а) и геометрические размеры торцевого профиля отрезанной части (рис. 5, б). Как можно видеть из представленных зависимостей, полученные результаты, хорошо согласуются с общепринятыми представлениями о процессе резки шевронными ножами [1] и экспериментальными данными (см. рис. 1). Таким образом, можно утверждать, что разработанная модель с достаточной степенью точности описывает исследуемый процесс.

На следующем этапе исследования моделировали условия резки с шевронным ножом конфигурация, которого была получена согласно [2]. Применительно к ножницам конструкции ПАО «НКМЗ» толщина ножедержателя с режущей пластиной составляет 220 мм, при этом длина прямолинейного участка согласно формуле (1) составила  $l = 283$  мм.

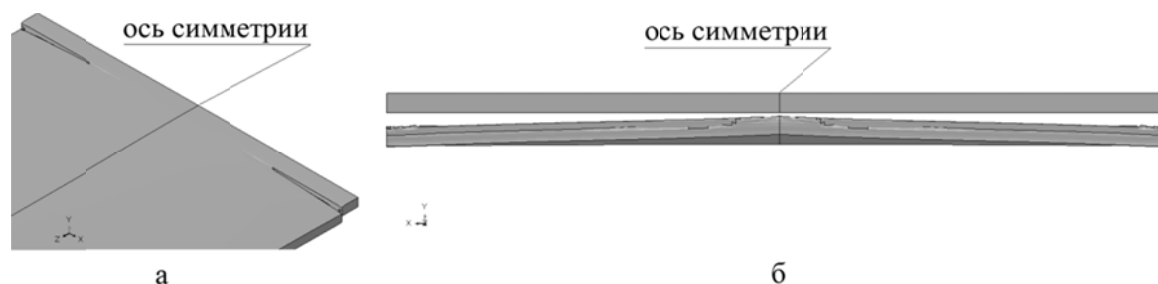


Рис. 4. Конфигурация листа на отдельных стадиях моделирования:  
а – стадия собственного реза; б – конечная форма торцевого профиля отрезанной части

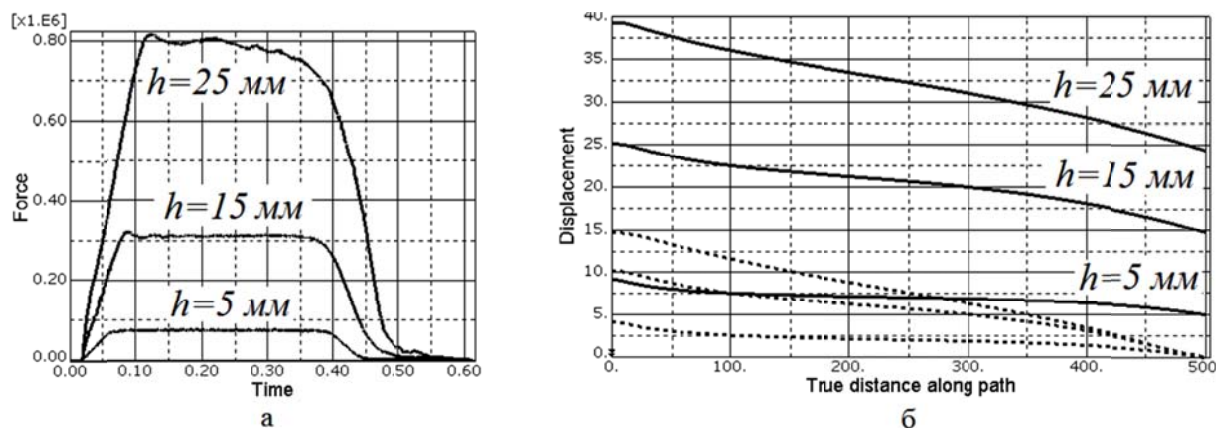


Рис. 5. Контролируемые параметры по результатам моделирования:  
а – зависимость силы (Н), приходящейся на одну часть шевронного ножа, на стадии резки; б – смещение в вертикальной плоскости (мм) верхней (сплошная линия) и нижней (пунктирная линия) граней на торцевой поверхности отрезанной части по мере удаления (мм) от оси симметрии после резки

Результаты моделирования представлены на рис. 6. Как можно видеть из представленных зависимостей сила резки (рис. 6, а) возрастает более чем в 1,5 раза, что в реальных условиях работы ножниц является недопустимым. В то же время, можно наблюдать существенное (на 41,5 %) снижение отклонения от прямолинейности в вертикальной плоскости (рис. 6, б).

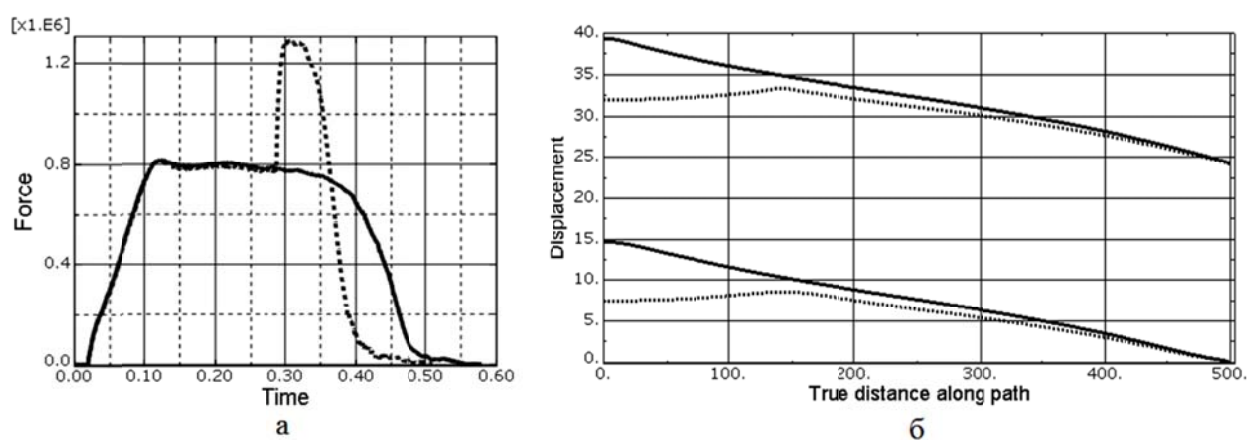


Рис. 6. Результаты моделирования для шевронного ножа с прямолинейным участком [2] длиной  $l = 283$  мм (пунктирная линия) для листа толщиной 25 мм в сравнении с классической конфигурацией (сплошная линия):  
а – зависимость половины силы резки (Н); б – смещение в вертикальной плоскости (мм) граней на торцевой поверхности по мере удаления (мм) от оси симметрии после резки

Очевидно, что даже при условии достижения показателей качества данный подход применительно к рассматриваемой конструкции ножниц неприменим, поскольку столь существенное увеличение силы для ряда марок сталей может привести к перегрузке ножниц, что недопустимо. Избежать таких перегрузок возможно, только снизив предельную разрезаемую толщину, что также является нежелательным.

Таким образом, учитывая все вышеизложенное, было решено рассмотреть вариант конструкции шевронного ножа, где вместо прямолинейного участка, введен участок в вершине схождения режущих кромок в виде скругления. В результате на третьем этапе исследования были смоделированы различные варианты скруглений для резки листов различной толщины.

После обработки результатов моделирования были получены зависимости, представленные на рис. 7. Так на рис. 7, а показана зависимость отношения величины максимальной силы  $F_{\max}$  резки к установившейся силе  $F$  резки классической конструкцией шевронного ножа в зависимости от отношения величины радиуса  $R$  скругления к толщине  $h$  разрезаемого листа. Как можно видеть из полученных распределений зависимости для листов толщиной 15 и 25 мм практически совпадают. При этом для радиуса  $R \leq 75h$  максимальная сила резки превышает установившуюся, не более чем на 10 %, что можно считать допустимой величиной перегрузки.

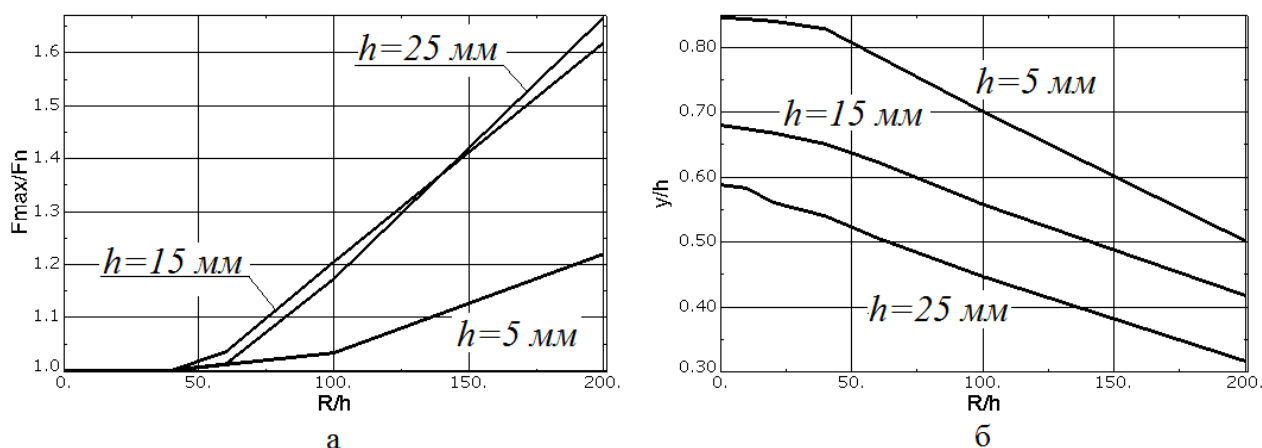


Рис. 7. Результаты моделирования для шевронного ножа со скругленным участком для листов различной толщины:

а – зависимость коэффициента увеличения силы резки  $F_{\max}/F$  от относительной величины  $R/h$  радиуса скругления ножа; б – зависимость величины относительного смещения  $y/h$  в вертикальной плоскости от относительной величины  $R/h$  радиуса скругления ножа

При этом из рис. 7, б, где представлены зависимости отношения величины смещения  $y$  в вертикальной плоскости к толщине  $h$  разрезаемого листа в зависимости от отношения величины радиуса  $R$  скругления к толщине  $h$  разрезаемого листа, видно, что величина смещения в вертикальной плоскости снижается на 11...18 %.

Сравнивая результаты моделирования процесса резки шевронными ножами с прямолинейным и скругленным участками, было отмечено (рис. 8), что при толщине листа 25 мм величина силы резки ножом с прямолинейным участком длиной  $l = 283$  мм практически совпадает с силой резки со скругленным участком радиусом  $R = 5000$  мм, а величина смещения в вертикальной плоскости меньше порядка 7,5 %.

Таким образом, можно утверждать, что конструкция шевронного ножа со скругленным участком является более эффективной с точки зрения повышения качества резки.

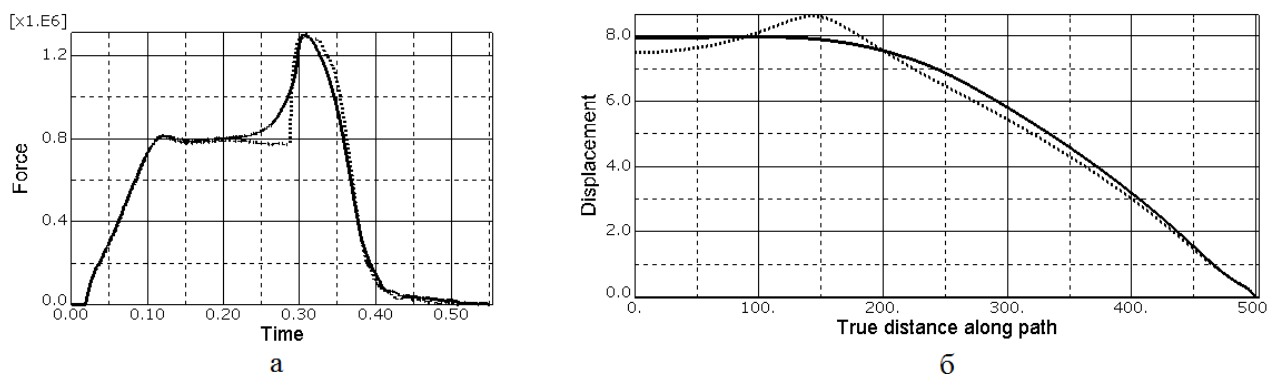


Рис. 8. Сравнительные результаты моделирования для шевронного ножа с прямолинейным (пунктирная линия)  $l=283$  мм и со скругленным (сплошная линия)  $R=5000$  мм участком для листа толщиной 25 мм:

а – половина силы резки; б – смещение в вертикальной плоскости

### ВЫВОДЫ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- повысить качество резки шевронным ножом представляется возможным за счет внесения изменений в конструкцию путем введения скругленного участка между режущими кромками ножа;

- величина радиуса скругления должна определяться по максимальной разрезаемой толщине листа и составлять не более  $75h$ , при этом увеличение силы резки не превысит 10 % от силы при резке ножами без скругления;

- увеличение силы резки на меньших разрезаемых толщинах будет более 10 %, однако, за счет меньшей толщины, не будет превышать предельно допустимых значений;

- величина смещения в вертикальной плоскости по ширине листа, за счет использования скругленного участка снижается на 11...18 % для максимальной разрезаемой толщины, что на меньших толщинах, при прочих равных условиях, будет еще выше;

- необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования с целью уточнения полученных результатов и дальнейшего совершенствования процесса резки шевронными ножами.

Результаты работы могут быть использованы для практического применения и при исследованиях и развитии процесса резки на ножницах с шевронным ножом.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ 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. : ил.
2. Пат. RU 2212986 С2, МПК В23D35/00. *Нож шевронный для резки листового материала* / Котелевец Ю. С., Арашкевич В. А., Иванов Ю. Д. и др. (RU). – № 2001120645/02 ; заявл. 23.07.2001 ; опубл. 27.09.2003.
3. Liu G. R. *The Finite Element Method: A Practical Course* / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 с.
4. Боровик П.В. *Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением* : монография / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – 299 с.
5. *Марочник сталей и сплавов* / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.] ; под общ. ред. А. С. Зубченко. – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с.
6. *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.

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

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: borovikpv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.01.2013 г.