

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ГОРЯЧЕЙ РЕЗКЕ НА НОЖНИЦАХ

Borovik P.V.

Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine

### THEORETICAL ANALYSIS OF SEPARATING PROCESS AT HOT CUTTING BY SHEARS

*Выполнен теоретический анализ процесса разделения металла в ходе горячей резки на ножницах с целью расширения представления о протекании процесса и влиянии закона накопления повреждаемости на зависимость силы резки при математическом моделировании. Разработана, конечно-элементная, модель процесса горячей резки на ножницах и получено удовлетворительное совпадение при сравнении результатов моделирования и экспериментальных данных. Выполнен анализ влияния модели накопления повреждений на зависимость силы резки. Отмечено, что закон накопления повреждаемости оказывает существенное влияние на результаты моделирования, а уменьшающаяся интенсивность накопления повреждений в металле способствует приближению расчетных значений силы резки к экспериментальным данным. Указывается, что на базе зависимостей силы резки можно получать информацию о законе накопления повреждений. Существует необходимость проведения более широкого спектра исследований. Результаты работы могут быть использованы при исследованиях разделительных операций в прокатном производстве.*

*Ключевые слова:* модель накопления повреждаемости, ножницы, сила резки

**Введение.** В технологических линиях производства толстых горячекатаных листов очень эффективным является применение процесса горячей резки [1], что позволяет снизить энергозатраты на разделительные операции и расширить технологические возможности оборудования участка резки. Дальнейшее совершенствование процесса горячей резки на ножницах возможно только при условии расширения представления о течении процесса и совершенствовании методов расчета.

В настоящее время при теоретических исследованиях широкого круга разнообразных задач достаточно активно используется метод конечных элементов (МКЭ) [2, 3], в том числе и при математическом моделировании разделительных операций в прокатном производстве. При этом максимально полная степень отображения реального процесса резки металла на ножницах в ходе моделирования МКЭ возможна только при соблюдении определенных условий, учитывающих его особенности [4].

Поскольку диапазон рабочих температур процесса горячей резки составляет 400...800°C [1], имеет место ограниченность информации о механических свойствах разрезаемых сталей [5], особенно при условии дальнейшего расширения номенклатуры обрабатываемых марок сталей. Кроме того, для получения данных о поведении материала, в процессе деформирования, как правило, используют испытания на растяжение, когда предельные деформации могут достигать 1,0 и зависят от температуры испытаний, тогда как в локальных объемах заготовок перед разрушением истинные деформации могут составлять 10...20 [6]. И, наконец, как показано в работе [7], модель использования пластичности металла может иметь как монотонный (линейный), так и нелинейный характер, что априори должно оказывать влияние на протекание процесса резки при интенсивном росте повреждений в металле.

**Цель.** Целью данной работы является теоретический анализ процесса разделения металла в ходе горячей резки на ножницах для расширения представления о протекании процесса и влиянии закона накопления повреждаемости на зависимость силы резки при математическом моделировании.

**Исследование.** Для достижения указанной цели проводились теоретические исследования на базе МКЭ путем математического моделирования процесса резки горячего металла на ножницах с параллельным резом.

Исследования осуществлялись на базе программного комплекса ABAQUS. Для чего была разработана, конечно-элементная, математическая модель, описывающая плоскую задачу резки параллельными ножами и учитывающая жесткость станины. Модель (рис. 1) состоит из трех абсолютно жестких недеформируемых тел – прижим, верхний и нижний ножи, а также деформируемого бруса, моделирующего лист и отрезаемую кромку. С целью учета упругой деформации станины в модель введен упругий элемент, а для исключения значительных динамических колебаний – вязкий демпфер.

При этом движение сообщается одновременно нижнему ножу и прижиму, тогда как верхний нож может смещаться, только преодолевая жесткость (упругую деформацию) упругого элемента (станины).

Деформируемый брус представляет собой сетку из изопараметрических четырехугольных линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования, имеющих свойства сплошной деформируемой среды в условиях плоской деформации.

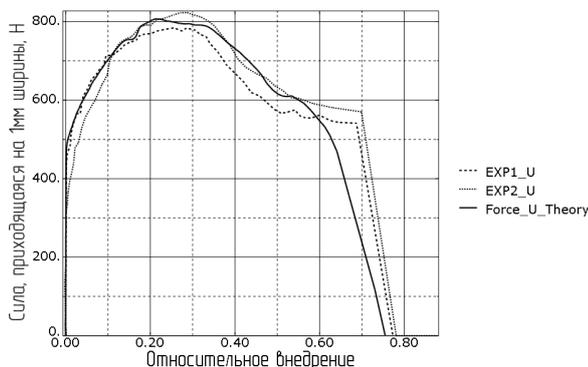
Учитывая, что процесс резки сопровождается большими пластическими деформациями, в ходе математического моделирования использовалась процедура адаптации сетки в формулировке Лагранжа-Эйлера [3, 6]. Инструменты представлялись как аналитические недеформируемые поверхности.

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

На левую боковую поверхность бруса накладывалось ограничение по его перемещению вдоль оси X.

Разрушение материала моделировалось методом исключения элементов из расчета, после исчерпания ресурса пластичности в соответствии с диаграммой пластичности [3, 6, 7].

На первоначальном этапе [8], с целью оценки адекватности представленной математической модели производилось сравнение расчетных величин с экспериментальными данными. А именно, были получены зависимости изменения во времени силы резки, приходящейся на 1 мм ширины от величины относительного внедрения ножей в металл по результатам расчетов и экспериментальным данным (рис. 2). Кроме того, сравнивались формы профиля заготовки по результатам моделирования (рис. 3 а) и после резки параллельными ножами (рис. 3 б). При этом можно утверждать, что имеет место достаточно высокая сходимость между теоретическим решением и экспериментом.



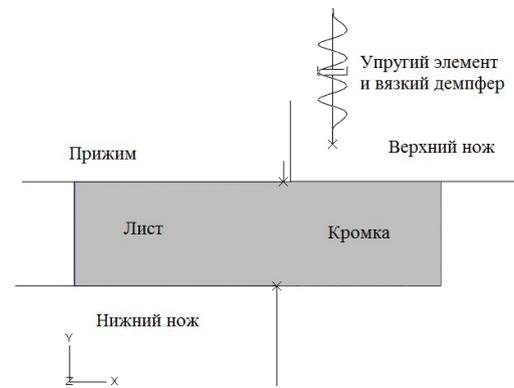
**Рис. 2. Графики изменения во времени силы резки, приходящейся на 1 мм ширины (а) и величины внедрения (б) ножей в металл по результатам расчетов и экспериментальных данных на примере стали А36 при температуре 650°С**

Однако следует отметить, что на этапе собственно реза можно наблюдать некоторое отличие по силе резки, что можно объяснить недостаточно исследованным механизмом накопления повреждаемости и разрушения материала для данной марки стали (А36) при данной температуре. Кроме того, следует указать, что в качестве диаграммы пластичности, согласно которой реализуется механизм разрушения, была взята диаграмма для стали близкой по химическому составу стали 09Г2 (поскольку найти такие данные для марки А36 при температуре резки не представляется возможным), а функция накопления повреждений (рис. 3 в) была подобрана, исходя из условия максимального приближения расчетных и экспериментальных данных. При этом вид функции накопления повреждений существенно отличается от описанных в литературе [7] и очевидно, что данный подход не вполне корректен с точки зрения достижения конечного результата.

Необходимость максимального сближения расчетных значений зависимости силы резки и экспериментальных данных обусловлена, прежде всего, существующими подходами [1, 9] к расчету энергосиловых параметров разделительных процессов в прокатном производстве, когда за основу берут зависимости, полученные при резке параллельными ножами. Кроме того, моделирование на базе МКЭ позволит расширить представление о процессах, протекающих в металле при резке, и в дальнейшем уточнить существующие методы расчета.

Учитывая полученные результаты, на втором этапе исследования производился анализ влияния модели накопления повреждений на зависимость силы резки.

В общем, процесс разрушения горячего металла следует рассматривать как вязкое разрушение – необратимое нарушение сплошности металла, сопровождаемое заметной пластической деформацией и значительным расходом энергии, при котором происходит разделение деформируемого твердого тела на части вследствие распространения в теле макроскопических трещин. При этом в материале наблюдается накопление повреждений – нарушение пластического равновесия, обусловленное разрыхлением материала, которое ведет к локализации деформации и последующему разрушению.



**Рис. 1. Общий вид модели резки параллельными ножами с учетом упругой деформации станины**

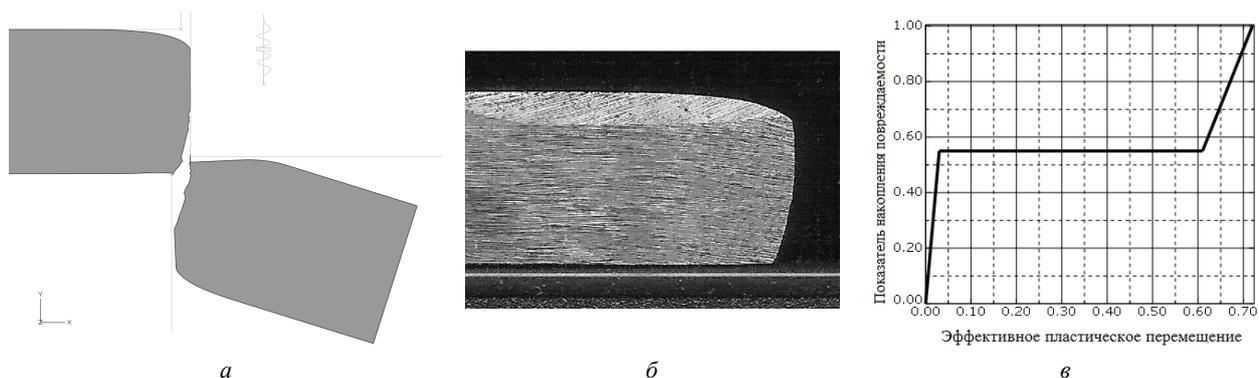


Рис. 3. Формы профиля заготовки по результатам моделирования (а) и после резки параллельными ножами (б), а также функция накопления повреждений (в), которая использовалась при моделировании

Функция повреждаемости  $D$  является интегралом функции напряжения и пути деформирования, а разрушение начинается, когда повреждаемость достигает критического уровня  $D_c$ . Поведение функции повреждаемости определяется законом развития разупрочнения материала в процессе деформирования и может иметь различный характер.

В данной работе накопление повреждаемости было основано на эффективном пластическом перемещении (Abaqus Analysis User's Manual), представляющее собой зависимость критерия начала вязкого разрушения  $d$  от эффективного пластического перемещения  $\bar{u}^{pl}$ :

$$d = \begin{cases} \left( \frac{1 - e^{-\alpha(\bar{u}^{pl}/\bar{u}_c^{pl})}}{1 - e^{-\alpha}} \right), & \text{если } \alpha \neq 0; \\ \bar{u}^{pl}/\bar{u}_c^{pl}, & \text{если } \alpha = 0, \end{cases}$$

где  $\bar{u}_c^{pl}$  – эффективное пластическое перемещение, при котором происходит полное разрушение;

$\alpha$  – показатель закона накопления повреждаемости.

Опираясь на известные данные о моделях повреждения [7] было решено в ходе вычислений использовать функции, имеющие линейный или близкий к линейному вид. В процессе моделирования изменяли два параметра характеризующие накопление повреждений в металле (см. табл.) – эффективное пластическое перемещение при котором происходит полное разрушение  $\bar{u}_c^{pl}$  и показатель закона накопления повреждаемости  $\alpha$ , поскольку они существенно зависят от температуры материала и влияют на его поведение и характер изменения силы, резки в ходе процесса. При этом знак показателя  $\alpha$  оказывает влияние на интенсивность накопления повреждений в металле, а именно при отрицательном значении показателя, интенсивность по мере нарастания эффективного пластического перемещения  $\bar{u}^{pl}$  увеличивается, а при положительном – снижается.

В качестве исследуемого материала была выбрана сталь 09Г2, поскольку для этой марки стали в литературе [7] приведены данные о ее пластичности в области близкой к исследуемому диапазону температур. Механические свойства для выбранной марки стали определяли по химическому составу в соответствии с известной методикой Л.В. Андreyока [10].

Учитывая, что на базе данной модели решается плоская задача, то жесткость станины ножниц участвующая в расчетах определялась как величина, приведенная к единице ширины разрезаемой заготовки

$$C = 2000 \frac{H/мм}{мм}.$$

Исходными данными для расчета были приняты следующие: толщина разрезаемого листа – 10 мм, ширина отрезаемой кромки – 15 мм, номинальная температура процесса – 600, 700 и 800 °C, скорость резки – 28 мм/с.

Таблица

Значения параметров, характеризующих накопление повреждений в металле при моделировании процесса резки

Номинальная температура процесса, °C	$\bar{u}_c^{pl}$	$\alpha$
600	0,34	-3...3
700	0,4	-3...3
800	0,46	-1...1

По результатам моделирования были получены зависимости изменения силы резки, приходящейся на 1 мм ширины (рис. 4) от относительного внедрения ножей в металл при различных температурах и значениях параметров, характеризующих накопление повреждений в металле.

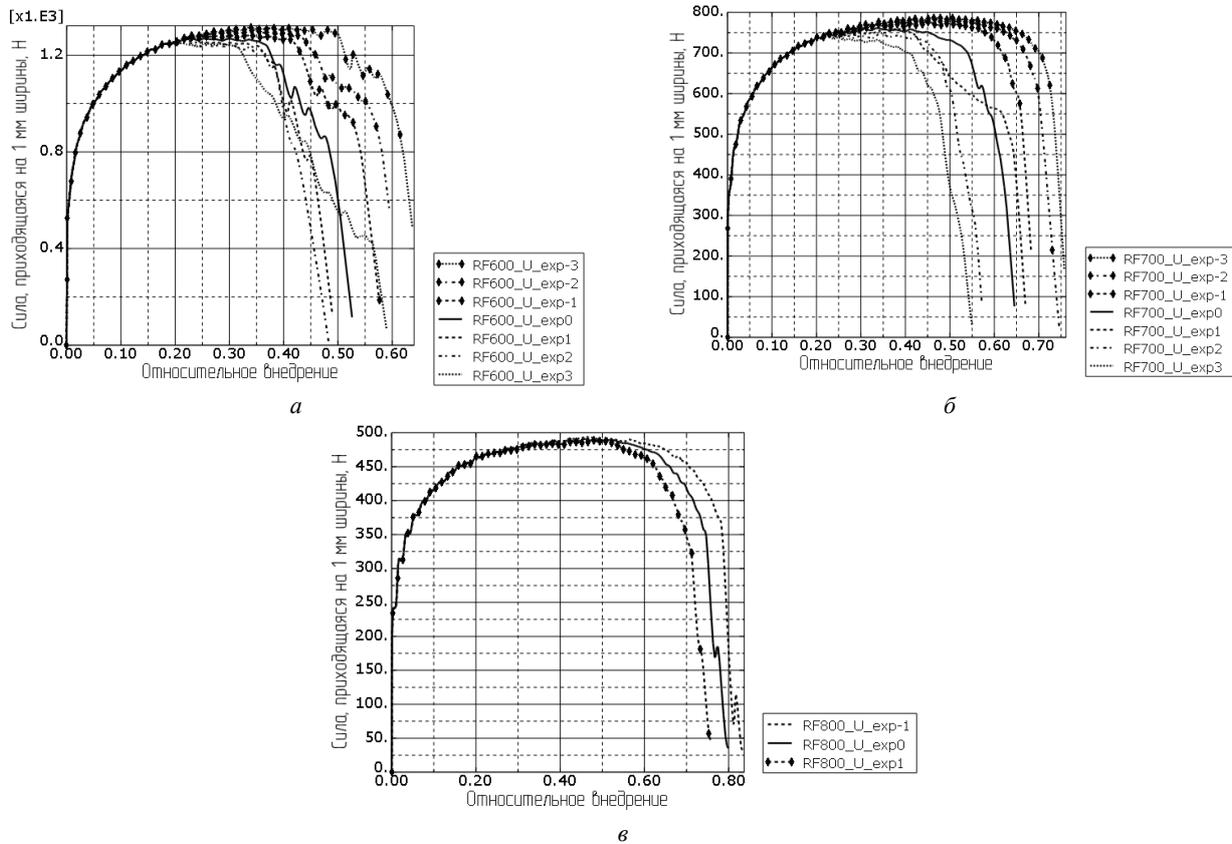


Рис. 4. Графики изменения силы резки, приходящейся на 1 мм ширины от относительной глубины внедрения при различных температурах и показателях накопления повреждаемости

Как можно видеть из представленных зависимостей, изменение показателя  $\alpha$  закона накопления повреждаемости существенно влияет на результаты моделирования завершающей стадии процесса резки на ножницах.

При этом можно отметить следующие тенденции:

- применение модели с возрастающей интенсивностью накопления повреждений в металле ( $\alpha < 0$ ) способствует более позднему разделению металла по отношению к линейной модели ( $\alpha = 0$ ) использования пластичности, тогда как применение модели с уменьшающейся интенсивностью накопления повреждений в металле ( $\alpha > 0$ ) приводит к сокращению длительности процесса;

- сила резки в зависимости «сила резки» – «относительное внедрение» принимает свое максимальное значение в диапазоне 0,2...0,5 относительного внедрения ножей в металл, причем меньшие значения соответствуют уменьшающейся интенсивности накопления повреждений, а большие – возрастающей;

- в более широком диапазоне изменения показателя  $\alpha$  (рис. 4 а и б) можно наблюдать изменение зависимости силы резки при определенных значениях  $\alpha$  (при температуре 600 °С для  $\alpha = 3$ , а при 700 °С – для  $\alpha = 1$ ), когда полученные результаты в большей степени согласуются с известными экспериментальными данными [1, 9].

В тоже время следует отметить, что варьирование показателя  $\alpha$  закона накопления повреждаемости не позволяет добиться в полной мере схождения расчетных и экспериментальных данных, что может являться следствием следующих факторов:

- отсутствие достоверной информации о законе накопления повреждаемости для металлов в указанном диапазоне температур;

- погрешности при экстраполировании значений интенсивности напряжений в сторону больших пластических деформаций, в частности наличие участка горячего наклепа на кривой «напряжение» – «деформация» [11].

Таким образом, можно утверждать, что значения параметров, характеризующих накопление повреждений в металле при моделировании процесса резки, могут варьироваться в широких пределах, однако для оценки

достоверности их величин необходимы, как дополнительные экспериментальные исследования, направленные на изучение свойств материалов, так и теоретические, которые будут способствовать расширению представления о процессе резки на ножницах.

Одним из возможных направлений исследований можно указать на более глубокое изучение экспериментальных зависимостей силы резки, из которых, как было показано в работе [12], можно получать информацию о механических свойствах разрезаемого металла. А учитывая результаты, полученные в данной работе можно утверждать, что из этих же зависимостей можно получать информацию о законе накопления повреждений, при условии достижения полного схождения расчетных и экспериментальных данных.

**Выводы.** По результатам работы можно сделать следующие выводы:

– сопоставительный анализ экспериментальных кривых силы резки и результатов математического моделирования процесса показывает высокую степень сходимости;

– при моделировании процесса горячей резки на ножницах зависимость силы резки на стадии разрушения существенно зависит от закона накопления повреждаемости, при этом для повышения степени сходимости следует использовать уменьшающуюся интенсивность накопления повреждений в металле;

– на базе зависимостей силы резки можно получать информацию о законе накопления повреждений, при условии достижения полного схождения расчетных и экспериментальных данных, что указывает на необходимость проведения более широкого спектра исследований, как экспериментального, так и теоретического характера.

Результаты работы могут быть использованы при дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях разделительных операций в прокатном производстве с целью расширения представления о процессе.

***Анотація.** Виконаний теоретичний аналіз процесу розділення металу в ході гарячого різання на ножницях з метою розширення уявлення про протікання процесу і впливанню закону накопичення пошкоджень на залежність сили різання за результатами математичного моделювання. Розроблена скінчено-елементна модель процесу гарячого різання на ножницях і отриманий задовільний збіг при порівнянні результатів моделювання і експериментальних даних. Виконаний аналіз впливу моделі накопичення пошкоджень на залежність сили різання. Відмічено, що закон накопичення пошкоджень істотно впливає на результати моделювання, а зменшувана інтенсивність накопичення пошкоджень в металі сприяє наближенню розрахункових значень сили різання до експериментальних даних. Вказується, що на базі залежностей сили різання можна отримувати інформацію про закон накопичення пошкоджень. Існує необхідність проведення ширшого спектру досліджень. Результати роботи можуть бути використані при дослідженнях розділових операцій в прокатному виробництві.*

***Ключові слова:** модель накопичення пошкоджень, ножці, сила різання*

***Abstract.** Purpose. Theoretical analysis of metal separating process during the hot cutting by shears for expansion the idea about the process and law of damage evolution to influence the curve of cutting force at the mathematical simulation.*

*Project/methodology/approach. The finite-elements model of hot cutting process by shears is developed. On the first research stage it was performed a comparison of simulation results and experimental data. It was obtained a good coincidence for the dependencies of cutting force and ingot geometry after cutting. And the function of damages evolution has a complex image. On the second stage the analysis of damages evolution model to influence the curve of cutting force was done.*

*Findings. The damages evolution regularities substantially to influence the results of mathematical simulation of hot cutting process by shears. Declining intensity of damage evolution in the metal promotes the approximation of calculation values of cutting force to experimental data. It is specified, that using the curves of cutting force one can get information about the damages evolution regulations. There is a necessity to carry on wider range of researches for expansion the idea about the process.*

*Originality/value. Job results can be used for the analyses of separation operations in a rolling production.*

***Keywords:** damage evolution model, shears, cutting force*

1. 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.
2. Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 с.
3. Боровик П. В. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением: Монография / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. – Алчевск : ДонДТУ, 2011. – 299 с.
4. Боровик П. В. Развитие методов численного моделирования процессов резки металла на дисковых ножницах / П. В. Боровик. / Сборник научных трудов / ДГМИ. – Алчевск, 2006. – Вып. 22. – С. 166-172.
5. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1976. – 488 с.
6. Wisselink H. H. Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph.D-Thesis / H. H. Wisselink. – Twente, The Netherlands, 2000.
7. Колмогоров В. Л. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров, А. А. Богатов, Б. А. Мигачев и др. – М. : Металлургия, 1977. – 336 с.

8. *Боровик П. В.* Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П. В. Боровик. / Сборник научных трудов / Вестник национального технического университета ХПИ. – Харьков, 2011. – Вып. 47. – С. 76-80.
9. *Целиков А. И.* Прокатные станы : учебник для вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 432 с.
10. *Коновалов Ю. В.* Расчет параметров листовой прокатки: Справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Metallurgija, 1986. – 430 с.
11. *Бельченко Г. И.* Основы металлографии и пластической деформации стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – К. ; Донецк : Вища шк., 1987. – 240 с.
12. *Боровик П. В.* Решение проблемы учета механических свойств материала при моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко. / Сборник научных трудов / ДонГТУ. – Алчевск, 2010. – Вып. 32. – С. 175-181.

## REFERENCES

1. *Borovik P. V.* Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovaniya processa prodol'noj rezki tolstyh gorjachekatanyh listov na diskovyh nozhnicah. Dis. na soiskanie uchen. stepeni kand. tehn. nauk, spec. 05.03.05 [Perfection of technology and equipment of the process of the longitudinal cutting of hot-rolled thick sheets on disk shears Ph.D-Thesis]. Kramatorsk, 2008. 225 p.
2. *Liu G. R., Quek S. S.* The Finite Element Method: A Practical Course, 2003. 348 p.
3. *Borovik P. V., Usatjuk D. A.* Novye podhody k matematicheskomu modelirovaniyu tehnologicheskikh processov obrabotki davleniem [New approaches to mathematical simulation of technological processes by pressure processing]. Alchevsk, DonDTU, 2011. 299 p.
4. *Borovik P. V.* Sbornik nauchnyh trudov DGMI [Collected papers of Donbass State Technical University]. Alchevsk, 2006, no. 22, pp. 166-172.
5. *Poluhin P. I., Gun G. Ja., Galkin A. M.* Soprotivlenie plasticheskoj deformacii metallov i splavov [Resistance of plastic strain of metals and alloys]. Moscow: Metallurgija, 1976. 488 p.
6. *Wisselink H. H.* Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph.D-Thesis. Twente, The Netherlands, 2000.
7. *Kolmogorov V. L., Bogatov A. A., Migachev B. A.* i dr. Plastichnost' i razrushenie [Plasticity and fracture]. Moscow: Metallurgija, 1977. 336 p.
8. *Borovik P. V.* Sbornik nauchnyh trudov Vestnik nacionalnogo tehniceskogo universiteta HPI [Collected papers of Bulletin of National Technical University HPI]. Kharkiv, 2011, no. 47, pp. 76-80.
9. *Celikov A. I., Smirnov V. V.* Prokatnye stany [Rolling mills]. Moscow: Metallurgizdat, 1958. 432 p.
10. *Konovalev Ju. V., Ostapenko A. L., Ponomarev V. I.* Raschet parametrov listovoj prokatki [Calculation of sheet rolling parameters]. Moscow: Metallurgija, 1986. 430 p.
11. *Bel'chenko G. I., Gubenko S. I.* Osnovy metallografii i plasticheskoj deformacii stali [Bases of a metallography and plastic strain of steel]. Donetsk: Vischa shk., 1987. 240 p.
12. *Borovik P. V., Lucenko V. A.* Sbornik nauchnyh trudov DonGTU [Collected papers of Donbass State Technical University]. Alchevsk, 2010. no. 32, pp. 175-181.