



Метод построения кривых сопротивления резке в процессе горячего разделения металла на ножницах

На базе двумерной конечно-элементной математической модели исследован процесс горячей резки на ножницах с параллельными ножами и установлены причинно-следственные связи поведения металла. Разработана одномерная математическая модель изменения силы резки от относительного внедрения, учитывающая влияние температуры и химического состава стали, а также скорости движения ножа. Адекватность метода подтверждается экспериментальными данными. Результаты работы могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров процесса горячей резки на ножницах. Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: ножницы с параллельными ножами, горячая резка, сила резки

On the base of two-dimensional finite-elemental mathematical model, hot cutting process by the shears with parallel blades was investigated and cause-and-effect relationships of metal behavior were established. A dimensional model of cutting force change depending on relative intrusion was developed, considering the temperature and chemical composition impact of steel, as well shear speed. Adequacy of the method is confirmed by experimental data. Results of research may be used when calculating energy-power parameters of hot cutting process with the help of shears.

Keywords: shears with parallel blades, hot cutting, cutting force

В условиях современного прокатного производства широко используются ножницы продольной и поперечной резки проката [1-4], которые являются весьма сложными машинами по кинематике и конструкции. При этом значительная часть операций по разделению металлопроката выполняется в горячем состоянии, что позволяет кроме снижения рабочих нагрузок использовать тепло прокатного нагрева в последующих технологических операциях [5].

Рост интенсивности производства, повышение требований к качеству готового металлопроката и стремление расширить технологические возможности ножниц обуславливают необходимость дальнейшего развития и совершенствования методов расчета энергосиловых и кинематических параметров ножниц различных конструкций.

Как показывает опыт проектирования ножниц и разработки методов расчета [1-3], особое место в этом вопросе отводится ножницам с параллельными ножами, поскольку они являются базисом для различных процессов разделения, реализуемых на ножницах других конструкций.

В работе [1] указывается, что зависимость силы резки от относительного внедрения ε ножей в металл можно получить, если известны экспериментальные кривые удельного $\tau(\varepsilon)$ или истинного $\tau_u(\varepsilon)$ сопротивления

$$P(\varepsilon) = \tau(\varepsilon)F_0 = \tau_u(\varepsilon)F, \quad (1)$$

где F_0 и $F = F_0(1 - \varepsilon)$ – соответственно исходная и текущая (после относительного внедрения ε) площадь перерезаемого сечения.

В то же время, классические методы расчета силы резки [1-3] параллельными ножами используют эмпирические коэффициенты, учитывающие затупление ножей и влияние бокового зазора, максимальные значения которых, по разным источникам, при горячей резке могут составлять от 1,5 [2] до 2 [3].

Очевидно, что столь существенное увеличение силы должно иметь и другие причины, прежде всего связанные с механическими свойствами разрезаемых сталей и условиями реализации процесса. Так в работах В. Ф. Егорова и В. И. Люленкова [2], базирующихся на объемных экспериментальных исследованиях, предложено учитывать влияние содержания углерода, хрома и никеля в разрезаемом металле, а также скоростные условия деформации и коэффициент напряженного состояния, который зависит от отношения ширины к высоте разрезаемой заготовки.

В настоящее время стремительный рост возможностей современной вычислительной техники способствует успешному развитию теоретических подходов и методов, которые позволяют решать разнообразные задачи, в том числе базирующиеся на методах теории упругости и пластичности, а также механики разрушения. В частности, следует отметить метод конечных элементов (МКЭ), который достаточно широко используется при моделировании различных технологических схем разделения металла [6-8].

Так, в работе [8] предложена двумерная математическая модель процесса горячей резки параллельными ножами на базе МКЭ. В данной модели при

расчете механических свойств для каждой из рассмотренных марок сталей и условий резки (табл. 1), была использована методика Л. В. Андреюка [9] по определению истинного сопротивления горячей деформации сталей и сплавов в зависимости от химического состава, температуры деформации, а также скорости и степени деформации. На рис. 1 представлены кривые удельного сопротивления горячей резке по экспериментальным данным А. И. Целикова [1, 2] и по результатам моделирования [8].

Таблица 1. Химический состав сталей и температура резки [1]

Марка стали	Химический состав, %							Температура резки, °C
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	
Сталь 20	0,20	0,52	0,24	0,04	–	0,026	0,030	650; 760; 970
Сталь 45	0,47	0,58	0,23	0,05	–	0,027	0,030	660; 760; 980
ШХ10	0,40	0,55	0,33	1,10	0,13	0,024	0,027	670; 780; 1090
Сталь 75	0,75	0,63	0,31	0,15	–	0,028	0,020	700; 860; 1020

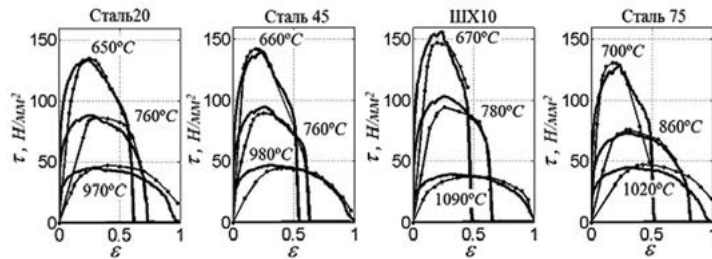


Рис. 1. Кривые удельного сопротивления τ (Н/мм²) горячей резке в зависимости от относительного внедрения ϵ по экспериментальным данным (•) А. И. Целикова [1, 2] и по результатам моделирования МКЭ (–) [8], полученные на образцах сечением 25×25 мм со скоростью резки 300 мм/с

Несмотря на высокую степень сходимости полученных результатов (расхождение по максимальным значениям не превышает 10 %), применение МКЭ в проектно-конструкторских работах далеко не всегда эффективно, так как связано с большими затратами времени на вычисления. Это указывает на целесообразность разработки более простых математических моделей.

В качестве цели данной работы ставилась задача разработать одномерную математическую модель по построению кривых удельного сопротивления в процессе горячего разделения металла на ножницах с параллельными ножами, учитывающую химический состав сталей, температуру и скорость реализации процесса.

Для достижения указанной цели использовали двухмерную математическую модель на базе МКЭ, которая решает плоскую задачу резки параллельными ножами с учетом жесткости станины и термодинамических эффектов при деформации материала [8].

Следует указать, что объем информации о на-

пряженно-деформированном состоянии материала в процессе резки по результатам моделирования МКЭ значительно обширнее (рис. 2) по сравнению с экспериментальными данными и способствует расширению представления о протекании процесса.

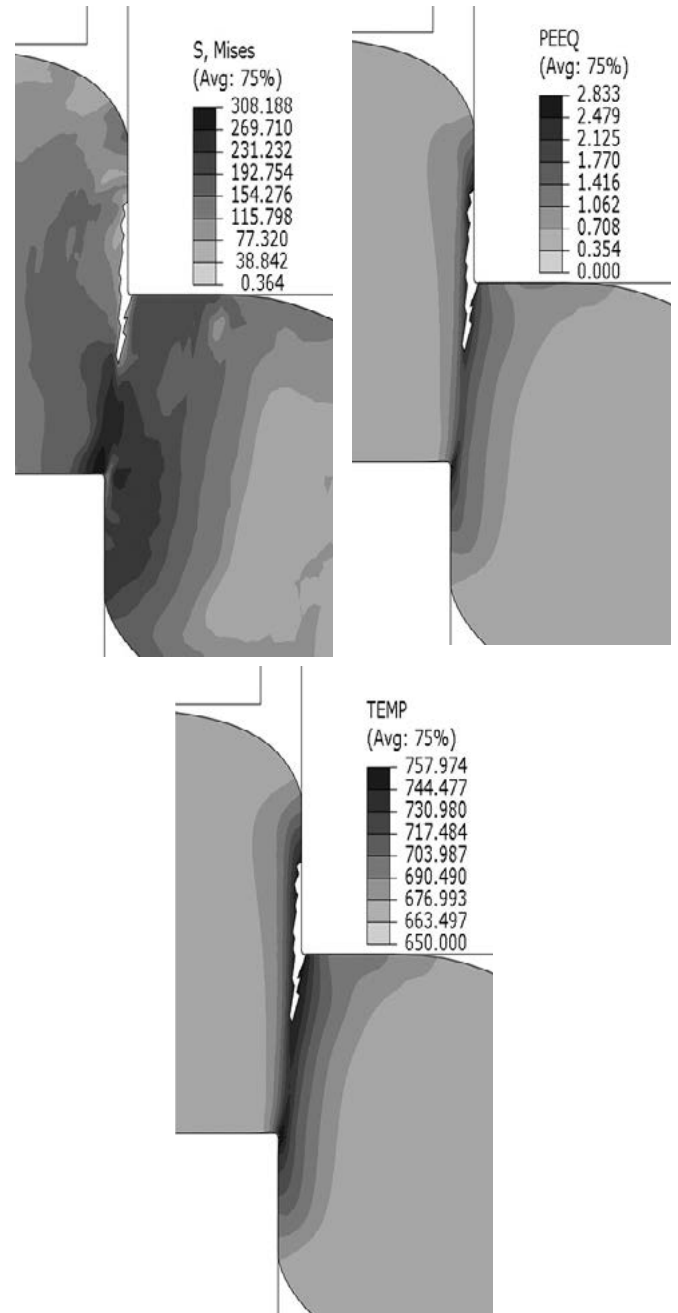


Рис. 2. Распределения интенсивности напряжений (S, МПа) и пластических деформаций (PEEQ), а также температуры (TEMP, °C) перед разделением по результатам моделирования МКЭ, полученные на образцах сечением 25×25 мм со скоростью резки 300 мм/с для стали 20 при температуре 650 °C

В ходе обработки результатов математического моделирования МКЭ определяли усредненные показатели исследуемых параметров для всех разрушаемых элементов. Данный подход позволил выявить ряд зависимостей, характерных процессу горячей

резки на ножницах с параллельными ножами, и разработать алгоритм расчета удельного сопротивления, с учетом химического состава, температуры деформации, а также скорости и степени деформации.

Кривая удельного сопротивления в процессе горячего разделения металла на ножницах с параллельными ножами описывается следующим выражением

$$\tau = \tau_u (1 - \varepsilon) = k_n k_\theta k_s \sigma_u \left[\bar{\varepsilon} \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} \sqrt{\varepsilon_n}}{32} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right] \cdot \left[e^{-8\bar{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 1 \right) + 1 \right] (1 - \varepsilon), \quad (2)$$

где $k_n=0,53$ – поправочный коэффициент, учитывающий изменение напряженного состояния при переходе от условий прокатки к срезу [8]; $k_\theta=1+\ln([1000/\theta_n]^{1/4})$ – коэффициент, учитывающий влияние начальной температуры θ_n (°C) на соотношение между истинным сопротивлением σ_u (МПа) деформации, определяемым по методике Л. В. Андреюка [9], и истинным сопротивлением срезу τ_u ; k_s – коэффициент, учитывающий ослабление остаточного сечения за счет накопления повреждений в материале; $\bar{\varepsilon}$ – степень пластической деформации в разрезаемом сечении при глубине относительного внедрения ε ; $\bar{\varepsilon}_{\max}$ – максимальная степень пластической деформации в разрезаемом сечении при полном разделении; ε_n – относительное внедрение до скола.

Коэффициент, учитывающий ослабление остаточного сечения за счет накопления повреждений в материале, определяется в зависимости от относительного внедрения ε

$$k_s = 1 - (1 - \varepsilon_n) [e^{A\varepsilon/\varepsilon_n} - 1] / [e^A - 1], \quad (3)$$

где A – показатель интенсивности накопления повреждений:

$$A = 3(2,14 + \varepsilon_n - C), \quad (4)$$

где C – процент содержания углерода в разрезаемом материале.

Степень пластической деформации также зависит от относительного внедрения ε ножей в металл и описывается следующей функцией

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_{\max} \left[e^{k_r \varepsilon/\varepsilon_n} - 1 \right] / \left[e^{k_r} - 1 \right] \cdot (2 - \varepsilon/\varepsilon_n)^{1/2}, \quad (5)$$

где k_r – коэффициент, учитывающий влияние максимальной степени пластической деформации на характер развития степени пластической деформации в ходе резки

$$k_r = 3 \left(\bar{\varepsilon}_{\max} / \bar{\varepsilon}_{\lim} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

Установлено, что максимальная степень пластической деформации в очаге резки, при полном разделении составляет

$$\bar{\varepsilon}_{\max} = \bar{\varepsilon}_{\lim} \varepsilon_n^{\bar{\varepsilon}_{\lim}/3}, \quad (7)$$

где $\bar{\varepsilon}_{\lim} = 10/\sqrt{3} = 5,77$ – предельная степень

пластической деформации, которая имеет место при относительном внедрении до скола равном $\varepsilon_n=1$.

Для определения скорости деформации $\dot{\bar{\varepsilon}}$, необходимой для расчета истинного сопротивления σ_u , в ходе процесса резки с известной скоростью движения ножа необходимо относительное внедрение ножей в металл представить в виде

$$\varepsilon = vt/h, \quad (8)$$

где v – скорость движения ножа, мм/с; t – время движения ножа, с; h – толщина разрезаемого листа, мм. Подставив выражение (8) в формулу (5) и проинтегрировав по времени, после несложных преобразований (с учетом обратной подстановки (8)) получим, с⁻¹

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} v}{h \varepsilon_n (e^{k_r} - 1)} \left[k_r e^{k_r \varepsilon/\varepsilon_n} (2 - \varepsilon/\varepsilon_n)^{1/2} - \frac{1}{2} (e^{k_r} - 1) (2 - \varepsilon/\varepsilon_n)^{-1/2} \right]. \quad (9)$$

Поскольку процесс резки сопровождается деформационным нагревом в очаге разделения, средняя температура в разрезаемом сечении при относительном внедрении ε может быть получена из следующего уравнения, °C

$$\theta = \theta_n + \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_{\max}} \right)^{1 - \frac{3}{2\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{\max}}{\bar{\varepsilon}_{\lim}} \right) \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_{\max}} \right)^{\sqrt{2}}} \Delta\theta, \quad (10)$$

где θ_n – температура нагрева заготовки перед резкой, °C; $\Delta\theta$ – приращение температуры в очаге деформации к моменту разрушения, °C.

Для определения величины приращения температуры производили статистическую обработку результатов моделирования для различных марок сталей (см. табл. 1) в диапазоне температур $\theta_n=650-1100$ °C, при резке заготовок толщиной $h=10-50$ мм со скоростью $v=25-500$ мм/с. В результате было получено уравнение регрессии

$$\Delta\theta = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum b_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + b_{ijklm} x_i x_j x_k x_l x_m, \quad (11)$$

где $x_1 = t_n = h\varepsilon_n/v$ – параметр, учитывающий время деформации до разрушения, с; $x_2 = \ln(k_n \sigma_{u0})$ – параметр, учитывающий величину начального сопротивления деформации при резке (σ_{u0} рассчитывается по методике Л. В. Андреюка [9] при степени пластической деформации $\bar{\varepsilon}_0 = 10^{-3}$, скорости деформации из уравнения (9) и температуре θ_n); $x_3 = \ln(\bar{\varepsilon}_{\max})$ – параметр, учитывающий степень пластической деформации в момент разрушения; $x_4 = \ln(\dot{\bar{\varepsilon}}_{\max})$ – параметр, учитывающий скорость пластической деформации в момент разрушения; $x_5 = e^f$ – параметр, учитывающий влияние трения. При этом величина коэффициента трения f определяется по известным [10] аналитическим зависимостям с учетом температуры, скорости протекания процесса, содержания

ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

углерода в разрезаемой стали, а также состояния инструмента; $b_0, b_p, b_{ij}, b_{ijk}, b_{ijkl}, b_{ijklm}$ – коэффициенты, значения которых при соответствующих комбинациях параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов к уравнению (11)

Коэф.	Значение	Коэф.	Значение	Коэф.	Значение	Коэф.	Значение
b_0	31727	b_{14}	33180	b_{123}	-370	b_{245}	-989
b_1	-50081	b_{15}	31833	b_{124}	-7866	b_{345}	-5012
b_2	-7732	b_{23}	10525	b_{125}	-7062	b_{1234}	1126
b_3	-41781	b_{24}	1536	b_{134}	-5966	b_{1235}	116
b_4	-6240	b_{25}	5032	b_{135}	-3169	b_{1245}	5116
b_5	-20627	b_{34}	7636	b_{145}	-21505	b_{1345}	3724
b_{12}	11089	b_{35}	27470	b_{234}	-1934	b_{2345}	1272
b_{13}	5773	b_{45}	4016	b_{235}	-6924	b_{12345}	-704

Оценка работоспособности модели (2)-(11) проводилась путем сравнения с результатами моделирования МКЭ для различных условий. При этом варьировали химический состав между минимальным и максимальным содержанием элементов, скорость движения ножа 25-500 мм/с, толщину разрезаемых заготовок 10-50 мм. Из представленных на рис. 3 зависимостей можно видеть, что предложенная математическая модель с достаточно высокой степенью точности согласуется с МКЭ. Величина отклонения по максимальным значениям удельного сопротивления резке в моделируемом диапазоне параметров не превысила 6,5 %.

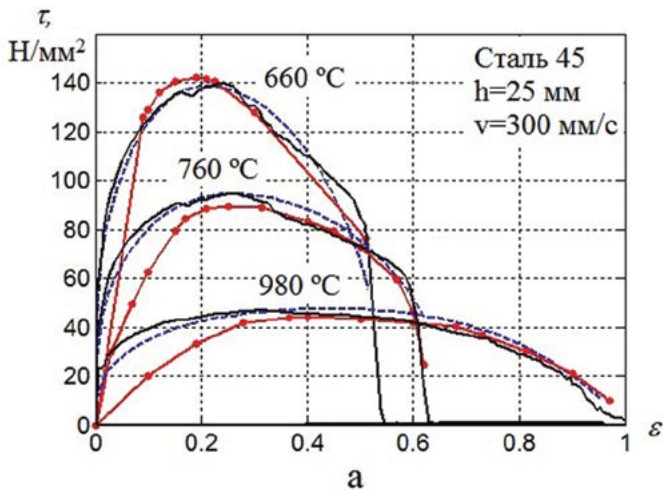
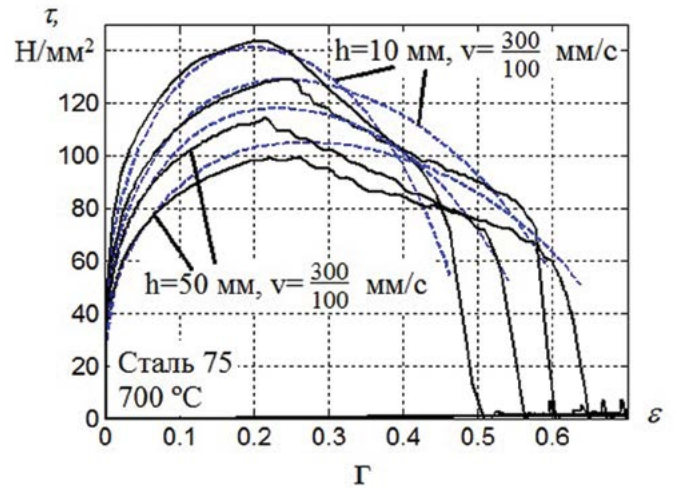
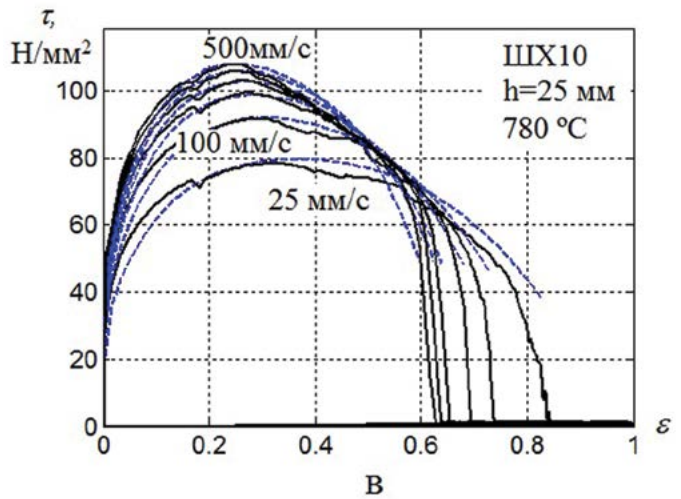
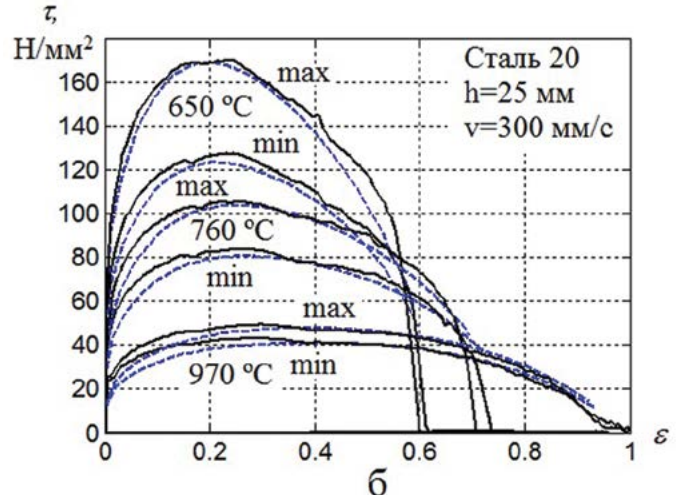


Рис. 3. Кривые удельного сопротивления резке по экспериментальным данным А. И. Целикова (•), МКЭ (-) и по модели (--) для условий:
 а – в соответствии с экспериментальными данными А. И. Целикова; б – с min и max содержанием химических элементов; в – с различной скоростью движения ножа (25, 100, 200, 300, 400, 500 мм/с); г – с различной толщиной и скоростью движения ножа

Обобщая полученные результаты, можно утверждать

дать, что в исследуемом диапазоне параметров отношения максимальных к минимальным значениям удельного сопротивления, а, следовательно, и силы резки составили:

- от колебаний в содержании стали химических элементов 1,1-1,35, причем большие значения соответствуют более низким температурам;
- от увеличения скорости движения ножа 1,3-1,4, независимо от температуры реализации процесса;
- от изменения толщины 1,15-1,25, при этом большие значения соответствуют более низким скоростям движения ножа.

Кроме того, следует указать, что снижение толщины разрезаемого сечения заготовки приводит к увеличению сопротивления резке, что объясняется некоторым увеличением скоростей деформации.

Таким образом, основными преимуществами разработанного метода расчета является следующее:

- расширенное представление о причинно-следственных связях процесса разделения горячего металлопроката на ножницах;
- возможность получения зависимостей удельного сопротивления резке от относительного внедрения ножей в лист;
- способность к оценке влияния температуры и химического состава стали, а также скорости движения ножа на величину удельного сопротивления резке.

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

- предложенные теоретические зависимости удельного сопротивления резке дают высокую степень сходимости с экспериментальными данными и результатами математического моделирования методом конечных элементов;
- предложенная методика построения кривых удельного сопротивления резке позволяет уточнить величину максимальной силы резки и расширить представление о разделительных операциях при резке заготовок в горячем состоянии.

Результаты работы могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров процесса горячей резки на ножницах с параллельными ножами, а также при дальнейших исследованиях разделительных операций.

Библиографический список

1. Целиков А. И. Прокатные станы: учебник для вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. – М.: Metallurgizdat, 1958. – 432 с.
2. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів. Навч. посіб. / Ф. К. Іванченко, В. М. Гребеник, В. І. Ширяев. – К.: Вища школа, 1995. – 455 с.
3. 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.
4. Современные ножницы для порезки полосового проката / Г. С. Суков, В. Н. Тиунов, Ю. Н. Белобров и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 1/1 (43). – С. 25-26.
5. Давыдов И. Е., Ракова И. В., Луцкий М. Б. и др. Получение требуемого уровня механических свойств листов с использованием тепла прокатного нагрева // Metallurg. и горноруд. пром-сть. – 2010. – № 4 (262). – С. 78-80.
6. 3D numerical simulation of anisotropic thin sheet metal slitting process using fully coupled constitutive equations including ductile damage / K. Saanouni, N. Belamri, P. Autesserre // International Journal of Material Forming, August 2009. – Volume 2, Issue 1 Supplement. – P. 535-538.
7. Numerical simulation of the fine blanking process of sheet titanium / J. Adamus, P. Lacki, W. Wieckowsky // Archives of metallurgy and materials, 2011. – Volume 56, Issue 2. – P. 431-437.
8. Боровик П. В. Выбор метода расчета механических свойств при моделировании процесса горячей резки на ножницах // Актуальные вопросы современной техники и технологии: сб. докладов IX-й Международной научной конференции (г. Липецк, 27 октября 2012 г.). / Отв. ред. А. В. Горбенко. – Липецк: Изд. центр «Гравис», 2012. – С. 45-52.
9. Расчет параметров листовой прокатки: Справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.
10. Теория прокатки: учебник для вузов / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

Поступила 11.12.2013



ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

В редакции можно приобрести по льготной цене авторские экземпляры журнала.

Просим заблаговременно подать заявку для формирования тиража.

контактный телефон 056-744-81-66

(факс) 0562-46-12-95