



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 67.05

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-56-62

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ НОЖАМИ

Терентьев Д.В., Байгузин М.Р., Платов С.И., Звягина Е.Ю., Тютеряков Н.Ш.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В настоящей работе проведено математическое моделирование процесса резания параллельными ножами. Выявлено, что важно учитывать при проектировании процесса резания влияние сил резания на механические свойства металла разрезаемой полосы, форму и размеры режущих инструментов, а также условия процесса, что позволяет производить более точные расчеты для определения оптимальных параметров резания и подбора режущих инструментов с целью повышения производительности и качества процесса резания. Результаты работы позволили снизить расхождение расчетных и экспериментальных значений усилий резания на 30% по сравнению с серией экспериментов, использующих методику Королева А.А. В работе представлены экспериментальные данные по определению коэффициента надреза ε_n . Предложенный способ определения коэффициента надреза металлов является одним из методов исследования резания металлов. Он основан на использовании наклонных ножей при резке клиновых листовых образцов. Этот метод позволяет получить данные о геометрических параметрах зоны резания и повышает точность расчета усилий резания наклонными ножами. Точность определения коэффициента надреза является важным фактором в механике резания. Это позволяет рассчитать необходимые параметры режима резания для максимальной эффективности и минимальных потерь материала и времени. Кроме того, использование наклонных ножей при резке клиновых листовых образцов может быть полезным при тестировании новых материалов или при разработке новых инструментов для резания металлов.

Ключевые слова: листовые ножницы, коэффициент надреза, процесс резания

© Терентьев Д.В., Байгузин М.Р., Платов С.И., Звягина Е.Ю., Тютеряков Н.Ш., 2023

Для цитирования

Математическое моделирование процесса резания листового металла параллельными ножами / Терентьев Д.В., Байгузин М.Р., Платов С.И., Звягина Е.Ю., Тютеряков Н.Ш. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 56-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-56-62>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF CUTTING SHEET METAL WITH PARALLEL KNIVES

Terentyev D.V., Baiguzin M.R., Platov S.I., Zvyagina E.Yu., Tyuteryakov N.Sh.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This paper considers mathematical modeling of the cutting process with parallel knives. It has been found that when designing the cutting process, it is important to factor into the influence of cutting forces on the mechanical properties of steel of the strip being cut, the shape and dimensions of cutting tools, as well as the process conditions, to get more accurate calculations, determine optimal cutting parameters and select cutting tools to improve performance and the quality of the cutting process. The research results contributed to reducing the discrepancy between the calculated and experimental values of cutting forces by 30% as compared with a series of experiments using the Korolev technique. The paper presents experimental data on determining cutting coefficient ε_H . The method proposed for determining the cutting coefficient is one of the methods for studying metal cutting. It is based on cutting wedge-shaped sheet samples with inclined knives. This method is used to obtain data on the geometric parameters of the cutting zone and increase accuracy of calculating the forces of cutting with inclined knives. Accuracy of determining the cutting coefficient is an important factor in cutting mechanics to calculate the required parameters of the cutting mode to achieve maximum efficiency and minimal loss of the material and time. In addition, cutting wedge-shaped sheet samples with inclined knives is useful, when testing new materials or developing new tools for cutting metals.

Keywords: sheet metal shears, cutting coefficient, cutting process

For citation

Terentyev D.V., Baiguzin M.R., Platov S.I., Zvyagina E.Yu., Tyuteryakov N.Sh. Mathematical Modeling of the Process of Cutting Sheet Metal with Parallel Knives. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 56-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-56-62>

Введение

Ножницы для резки металлических листов работают путем сдвига частей листа друг относительно друга, что приводит к периодическому процессу резки [1-8, 12, 13].

В процессе этого возникают периодические явления в виде вмятия, резания, а также отрыва (рис. 1).

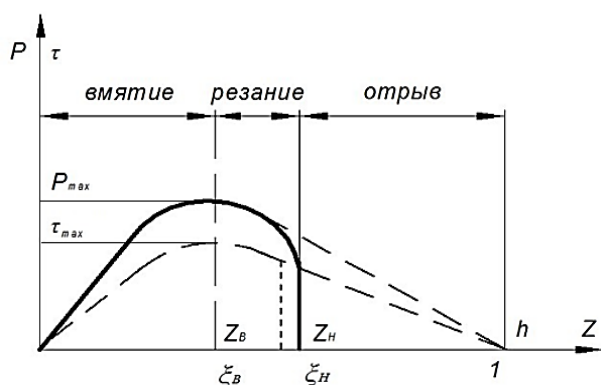


Рис. 1. Характерный вид зависимостей $P = f(\xi)$, $\tau = f(\xi)$ при резании полосы параллельными ножами

Fig. 1. Characteristic dependences $P = f(\xi)$, $\tau = f(\xi)$, when cutting strips with parallel knives

В период резания в первую очередь происходит определенный сдвиг всех основных частей полосы непосредственно по всей плоскости резания, и величины P и τ уменьшаются до нуля.

Коэффициент надреза характеризует периоды вмятия и учитывается в формуле А.А. Королёва, широко используемой для расчета усилий резания:

$$P_{\max} = \frac{(2 - \varepsilon_H) \varepsilon_H}{2 \operatorname{tg} \alpha} h^2 k \sigma_b, \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальное значения усилия, прилагаемого при осуществлении резки ножами наклонного типа; k – значение, учитывающее именно боковой зазор, а также значения затупления используемых ножей, изгиб самого металлического листа, а также непосредственно соотношения максимальных пределов прочности по их напряжениям (как нормальным, так и непосредственно касательным); σ_b – максимальное значение прочности использованного в листе материала; $\angle \alpha = 1-6^\circ$ – данный фрагмент обозначает непосредственный угол наклона режущего инструмента.

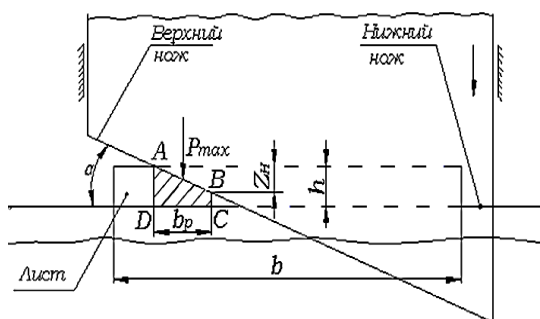
Достоверность расчетов по формуле (1) будет определяться достоверностью значений коэффициента надреза ε_H . Она используется для расчета усилия резания наклонными ножами и основана на предположении, что касательные напряжения равномерны

по всей зоне резания и достигают максимального значения. Однако это допущение приводит к завышению расчетных усилий. Для более точного определения коэффициента надреза ϵ_n в металлах был предложен экспериментальный метод, основанный на шаговой резке клиновидных листовых образцов наклонными ножами. Этот метод позволит получить более точные данные для расчета усилий резания.

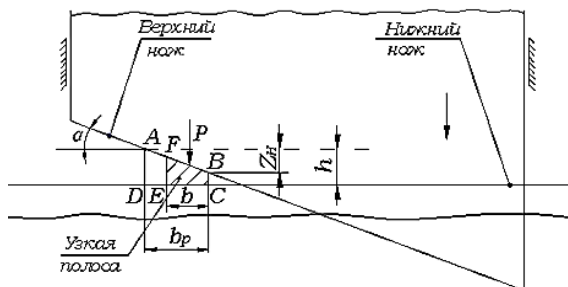
В точной аналогии с изображенной на рис. 2 схемой зависимость для максимально точного определения значения надреза можно непосредственно представить в виде следующей формулы:

$$\epsilon_n = \frac{b_p \cdot \operatorname{tg} \alpha}{h}; \tag{2}$$

$$b_p = b_r = (1,2 \div 1,6) \frac{\delta \cdot h}{\operatorname{tg} \alpha}. \tag{3}$$



а



б

Рис. 2. Схемы резания наклонными ножами: а – широкого листа ($b > b_p$); б – узкой полосы ($b < b_p$)
 Fig. 2. Diagrams of cutting with inclined knives: а is a wide sheet ($b > b_p$); б is a narrow strip ($b < b_p$)

Таблица 1. Результаты эксперимента
 Table 1. Experimental results

Параметр	Номер реза									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ширина реза b , мм	5,57	7,93	10,3	12,64	14,44	17,37	19,71	22,07	24,43	26,78
Усилие резания P , кН	3,94	5,27	7,3	8,95	10,6	11,21	11,25	11,18	11,24	–

Проведение эксперимента

Для эксперимента изготовили образец и осуществили шаговую резку с фиксацией усилия резания P и ширины реза b (рис. 3).

Клиновидные образцы могут использоваться для измерения ширины зоны резания при резке листов. Эти образцы имеют начальную ширину значительно меньше зоны резания и могут быть использованы для шаговой резки с заданным шагом. Этот метод позволяет достигнуть значения ширины зоны резания на узкой длине образца, которое равно ширине зоны резания на широких листах.

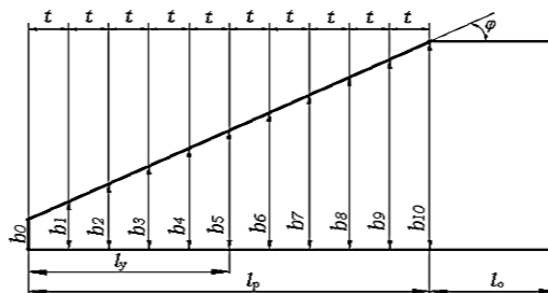


Рис. 3. Форма и размеры клиновидного образца
 Fig. 3. Shape and dimensions of the wedge-shaped sample

С учетом зависимости (3)

$$b_0 = \frac{0,25 \cdot 1,2 \delta h}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{0,3 \delta h}{\operatorname{tg} \alpha} \tag{4}$$

принимая наименьшую ширину образца равной значению b (минимальное значение). Число точек на восходящей линии графика n определяется длиной узкой части отрезка l и шагом резки a , который зависит от конструкции блока резки.

Результаты эксперимента определения коэффициента надреза ϵ_n в металлах занесены в табл. 1.

Результаты эксперимента определения коэффициента надреза ϵ_n в металлах показывают, что увеличение усилия резания происходит в самых первых пяти резах, захватывая узкую зону образца. В широкой зоне образца усилие резания практически одинаково в последующих резах. Исходя из этого, был построен график (рис. 4), на котором кривая резания для первых пяти резов пересекается с горизонтальной линией, соответствующей среднему значению усилий резания для 6-9 резов. Далее кривая резания продлена вверх до пересечения с линией среднего значения, величина b_r определяется по точке пересечения этих линий.

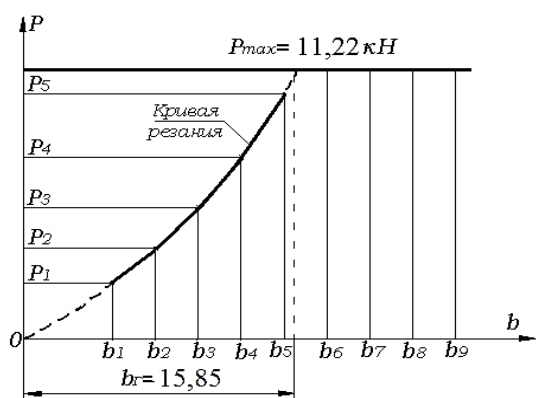


Рис. 4. График зависимости усилия резания $P = f(b)$ от ширины зоны резания
Fig. 4. Diagram of the dependence between cutting force $P = f(b)$ and width of the cutting zone

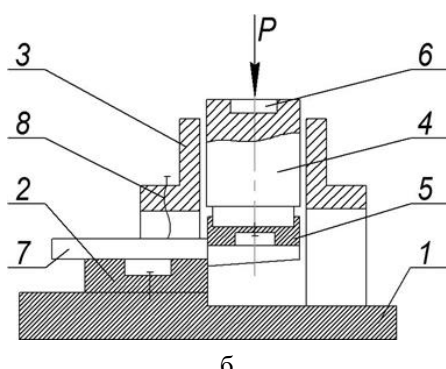
Тогда коэффициент надреза

$$\varepsilon_{\text{н}} = \frac{b_r}{h} \operatorname{tg} \alpha = \frac{15,85 \cdot 0,07}{3} = 0,37.$$

Следующим этапом эксперимента является исследование для определения усилий резания для ряда материалов. Для этого была разработана лабораторная установка (рис. 5, а) с использованием режущего устройства (рис. 5, б).



а



б

Рис. 5. Проведение эксперимента: а – лабораторная установка; б – схема режущего устройства
Fig. 5. Conducting the experiment: а is a laboratory plant, б is a diagram of the cutting tool

На лабораторной установке ЭВМ 1 выводит регистрируемые параметры при помощи датчиков давления и перемещения, которые интегрированы в настольный гидравлический пресс 3 с усилием 100 кН. Насосный агрегат 2 развивает давление 12 МПа, расход 3,2 л/мин, объем бака 7 л.

Конструкция режущего устройства (см. рис. 5, б) включает в себя основание 1, на котором установлен неподвижный нож 2 и направляющие 3. В направляющих перемещается пуансон, который имеет квадратное сечение размером 50×50 мм. На нижнем торце пуансона закреплен подвижный нож 5, а на верхнем торце имеется проточка 6 для установки линзы для компенсации перекосов. Полоса 7 устанавливается между ножами и закрепляется винтом 8.

Исследования проводились в три основных этапа.

В процессе эксперимента резали полосы шириной $b = 45$ мм из стали (толщина $h = 3$ мм), меди (толщина $h = 4$ мм), сплава алюминия (толщина $h = 5$ мм).

По графику (рис. 6) определяли высоту зоны резания Z_B и максимальное усилие резания P_{\max} .

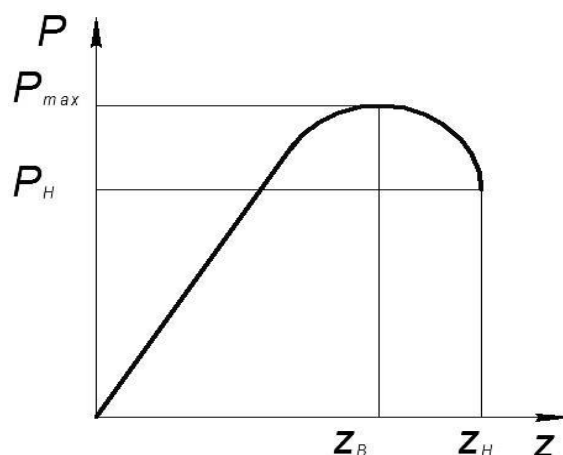


Рис. 6. Характерный вид графиков $P = f(z)$ при резании параллельными ножами
Fig. 6. Characteristic graphs $P = f(z)$, when cutting with parallel knives

Для меди $Z_B = 1,25$ мм; для стали $Z_B = 0,8$ мм; для сплава алюминия $Z_B = 1,65$ мм.

$$\text{Тогда } \xi_B = \frac{Z_B}{h}.$$

$$\xi_B = \frac{1,25}{4} = 0,31 \text{ – для меди;}$$

$$\xi_B = \frac{0,8}{3} = 0,26 \text{ – для стали;}$$

$$\xi_B = \frac{1,65}{5} = 0,33 \text{ – для сплава алюминия.}$$

Максимальные значения усилия резания составили:
 $P_{\max} = 33,53$ кН – для меди;
 $P_{\max} = 44,95$ кН – для стали;
 $P_{\max} = 16,58$ кН – для сплава алюминия.

Силовой параметр $K\sigma_B$ определяли в соответствии с зависимостью

$$P_{max} = K\sigma_B F_0 (1 - \xi_B). \quad (5)$$

Тогда

$$K\sigma_B = \frac{P_{max}}{bh(1 - \xi_B)}. \quad (6)$$

$$K\sigma_B = \frac{33,53}{45 \cdot 4 \cdot (1 - 0,31)} = 0,27 \text{ кН/мм}^2 \text{ – для меди;}$$

$$K\sigma_B = \frac{44,95}{45 \cdot 3 \cdot (1 - 0,26)} = 0,45 \text{ кН/мм}^2 \text{ – для стали;}$$

$$K\sigma_B = \frac{16,58}{45 \cdot 5 \cdot (1 - 0,33)} = 0,11 \text{ кН/мм}^2 \text{ – для сплава}$$

алюминия.

На следующем этапе при определении усилия резания наклонными ножами резали заготовки из стали, меди и сплава алюминия тех же размеров, что резали параллельными ножами. При этом использовали ножи с четырьмя значениями угла наклона кромок:

- 1) $\alpha = 10,03^\circ = 0,175$ рад;
- 2) $\alpha = 7,85^\circ = 0,137$ рад;
- 3) $\alpha = 6,31^\circ = 0,11$ рад;
- 4) $\alpha = 4,01^\circ = 0,07$ рад.

На рис. 7 приведен характерный вид графиков за-

висимости $P = f(H)$ при резании полос ограниченной ширины ($b = 45$ мм), где H – величина перемещения подвижного ножа.

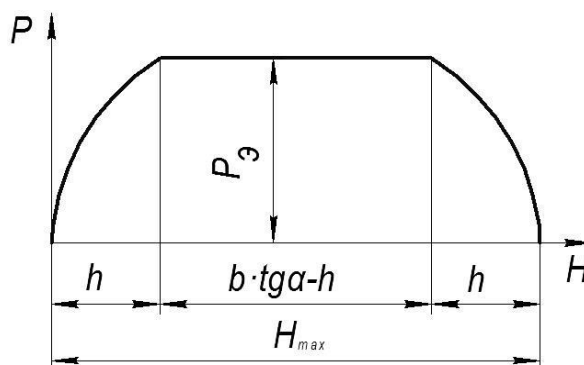


Рис. 7. Характерный вид графиков зависимости $P = f(H)$ при резании наклонными ножами

Fig. 7. Characteristic dependences $P = f(H)$, when cutting with inclined knives

Максимальное перемещение ножа $H_{max} = b \cdot tg\alpha + h$ обеспечивает рез заготовки. На величине хода $H = b \cdot tg\alpha - h \cdot \xi_H$ в средней части усилие резания P_3 имеет постоянную максимальную величину. Экспериментальные значения данных усилий приведены в табл. 2.

Таблица 2. Соотношения усилий резания для ряда материалов
Table 2. Ratios between cutting forces for some materials

Номер ножа	Материал и толщина h , мм	Экспериментальные значения усилий резания P_3 , кН	Расчетные значения усилий резания P , кН		Соотношения усилия резания		
			$P_{Королев}$	P	$P_{Королев}/P_3$	P/P_3	P_K/P
1	4-медь	7,08	10,16	7,22	1,43	1,02	1,40
2	4-медь	8,86	12,98	9,22	1,46	1,04	1,33
3	4-медь	10,94	16,17	11,48	1,48	1,05	1,40
4	4-медь	17,87	25,41	18,05	1,42	1,01	1,41
1	3-сталь	4,90	6,97	4,71	1,42	1,04	1,48
2	3-сталь	6,44	8,90	6,02	1,38	1,07	1,47
3	3-сталь	7,87	11,09	7,49	1,41	1,05	1,34
4	3-сталь	11,22	17,43	11,78	1,55	1,05	1,48
3	5-сплав алюминия	6,34	9,85	7,65	1,55	1,05	1,48
4	5-сплав алюминия	10,05	15,48	10,45	1,54	1,04	1,48

Обсуждение результатов

Из табл. 2 видно, что информационные данные усилий резания значительно отличаются от расчетных значений, полученных по известной методике Королева А.А. [1]. Расчетные значения по этой методике завышены в среднем на 1,38-1,55 раза. В свою очередь, усилия, рассчитанные по предлагаемому методу, отличаются от экспериментальных значений только в 1,01-1,07 раза.

Выводы

Экспериментальные данные по определению коэффициента надреза ε_n в металлах показывают, что увеличение усилия резания происходит в самых первых пяти резах, захватывая узкую зону образца. В широкой зоне образца усилие резания практически одинаково в последующих резах.

В ходе математического моделирования процесса резания параллельными ножами было установлено, что в серии экспериментов расхождение расчетных и экспериментальных значений усилий на 30% меньше в сравнении с методикой Королева А.А.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях, связанных с развитием технологии и оборудования процесса резки листового металлопроката на ножницах [9-11, 13].

Список источников

1. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. М.: Metallurgy, 1985. 376 с.
2. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х т. Т. 3. Машины и агрегаты для отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин и др. М.: Metallurgy, 1981. 576 с.
3. Потапенков А.П., Байгузин М.Р., Пилипенко С.С. Удельная работа сил резания проката ножницами // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. №8. С. 531-535.
4. А.с. № 938091 А1 СССР, МПК G01N 3/24. Образец для испытания листовых материалов на сдвиг в плоскости листа: № 3228808: заявл. 30.12.1980: опубл. 23.06.1982 / А.Д. Матвеев, Н.Ф. Шпунькин, В.М. Готовкин [и др.]; заявитель Московский автомеханический институт.
5. А.с. № 1555645 А1 СССР, МПК G01N 3/00. Способ исследования механических свойств материала: № 4336973: заявл. 30.11.1987: опубл. 07.04.1990 / Г.А. Дробахин; заявитель научно-производственное объединение по технологии машиностроения «ЦНИИТМАШ».
6. А.с. № 1002890 А1 СССР, МПК G01N 3/00, G01N 3/24. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжений при продольном сдвиге: № 3366672: заявл. 16.12.1981: опубл. 07.03.1983 / В.И. Смирнов; заявитель предприятие П/Я А-3700.

7. Пат. № 2132535 С1 Российская Федерация, МПК G01B 15/04. Способ определения формы профилей надрезов на поверхности твердых тел: № 93044155/28: заявл. 13.09.1993: опубл. 27.06.1999 / А.С. Савинов, П.П. Петров, Н.С. Мординов; заявитель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН.
8. Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С., Якушев А.Н. Конструкции и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов. М.: НКЦ, 2003. 436 с.
9. Терентьев В.С., Цалюк М.Б. Адьюстаж технолитовых станов. Отделочные машины. Свердловск: Metallurgizdat. Свердл. отд-ние, 1961. 344 с.
10. Селезнев М.Е., Алексеенко С.В., Боровик П.В. Перспективы развития технологии и оборудования процесса поперечной резки листового металлопроката на ножницах с шевронным ножом // Тяжелое машиностроение. 2019. №5-6. С. 34-36.
11. Никоноров Л.В. Силовые параметры при резании проката ножницами // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сб. ст. II Всерос. науч.-практ. конф. Пенза: Приволжский дом знаний, 2005. С. 25-29.
12. Теория резания: учебник для студентов вузов / П.И. Ящерицын и др. Мн.: Новое знание, 2005. 512 с.
13. Павлова Н.Г., Никитин С.В., Емельюшин А.Н. Исследование условий эксплуатации пресс-ножниц для переработки металлолома с целью повышения их производительности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №3(43). С. 81-85. EDN RCNMMX.

References

1. Korolev A.A. *Konstruktsiya i raschet mashin i mekhanizmov prokatnykh stanov* [Design and calculations of machines and mechanisms of rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 376 p. (In Russ.)
2. Tselikov A.I., Polukhin P.I. et al. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3-kh t. T. 3. Mashiny i agregaty dlya otdelki prokata* [Machines and lines of metallurgical plants. In 3 volumes. Vol. 3. Machines and lines for trimming rolled products]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 576 p. (In Russ.)
3. Potapenkov A.P., Baiguzin M.R., Pilipenko S.S. Specific work of forces of cutting the rolled products with shears. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2016;59(8):531-535. (In Russ.)
4. Matveev A.D., Shpunkin N.F., Gotovkin V.M. et al. *Obrazets dlya ispytaniya listovykh materialov na sdvig v ploskosti lista* [A sample for shear testing of sheet materials in the plane of sheets]. Author's Certificate SU, no. 938091A1, 1982.
5. Drobakhin G.A. *Sposob issledovaniya mekhanicheskikh svoystv materiala* [A method of studying me-

- chanical properties of materials]. Author's Certificate SU, no. 1555645 A1, 1990.
6. Smirnov V.I. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koef-fitsienta intensivnosti napryazheniy pri prodolnom sdvige* [A method of determining a critical stress intensity factor during longitudinal shear]. Author's Certificate SU, no. 1002890 A1, 1983.
 7. Savinov A.S., Petrov P.P., Mordinov N.S. *Sposob opredeleniya formy profilei nadrezov na poverkhnosti tverdykh tel* [A method of determining a shape of cutting profiles on the surface of solids]. Patent RU, no. 2132535 C1, 1999.
 8. Lukashkin N.D., Kokhan L.S., Yakushev A.N. *Konstruktsii i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnyy dlya vuzov* [Design and calculations of machines and lines of metallurgical plants: university textbook]. Moscow: NKTs, 2003, 436 p. (In Russ.)
 9. Terentev V.S., Tsalyuk M.B. *Adyustazh tekhnolisto-vykh stanov. Otdelochnye mashiny* [Auxiliaries of sheet mills. Trimming machines]. Sverdlovsk: Metal-lurgizdat. Sverdlovsk Branch, 1961, 344 p. (In Russ.)
 10. Seleznev M.E., Alekseenko S.V., Borovik P.V. Prospects of development of technology and equipment of cutting to length sheet products by shears with inclined knives. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering]. 2019;(5-6):34-36. (In Russ.)
 11. Nikonov L.V. Power parameters of cutting rolled products with shears. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva mashin i priborov: sb. st. II Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Technological quality assurance of machines and devices: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference]. Penza: Volga Region Center of Knowledge, 2005, pp. 25-29. (In Russ.)
 12. Yashcheritsyn P.I. et al. *Teoriya rezaniya: uchebnyy dlya studentov vuzov* [Theory of cutting: university textbook]. Minsk: Novoe znanie, 2005, 512 p. (In Russ.)
 13. Pavlova N.G., Nikitin S.V., Emelyushin A.N. Studying operation conditions of a shearing press for scrap processing to increase its performance. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013;(3(43)):81-85. EDN RCNMMX.

Поступила 20.09.2023; принята к публикации 12.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 20/09/2023; revised 12/10/2023; published 25/12/2023

Терентьев Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор, ректор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: dtnterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

Байгузин Марсель Раисович – соискатель, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: bayguzinmr@nornik.ru.

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Звягина Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: zviagina_mmf@mail.ru. ORCID 0009-0001-4948-5366

Тютеряков Наиль Шаукатович – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: n.tyuteryakov@magtu.ru. ORCID 0000-0002-5008-4156

Dmitry V. Terentyev – DrSc (Eng.), Professor, Rector, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: dtnterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

Marsel R. Baiguzin – applicant of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: bayguzinmr@nornik.ru.

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Elena Yu. Zviagina – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: zviagina_mmf@mail.ru. ORCID 0009-0001-4948-5366

Nail Sh. Tyuteryakov – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: n.tyuteryakov@magtu.ru. ORCID 0000-0002-5008-4156