

УДК 621.961.2

УДЕЛЬНАЯ РАБОТА СИЛ РЕЗАНИЯ ПРОКАТА НОЖНИЦАМИ

Пилипенко С.С., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование» (pilipenko@norvuz.ru)

Байгузин М.Р., ассистент кафедры «Технологические машины и оборудование»

Потапенков А.П., д.т.н., профессор кафедры «Технологические машины и оборудование»

Норильский индустриальный институт
 (663310, Россия, г. Норильск, ул. 50 лет Октября, 7)

Аннотация. Изложен вывод и анализ трех вариантов аналитических зависимостей удельной работы резания от прочностных и пластических свойств материалов разрезаемой полосы, которые характеризуются соответственно пределом прочности и коэффициентами вмятия и надреза. Выводы базируются на трех принятых сочетаниях зависимостей усилия резания от относительного внедрения ножей в полосу, характеризующих соответственно периоды вмятия и резания. Исследованы сочетания квадратичной и линейной зависимостей, двух квадратичных и использование одной квадратичной зависимости в зоне вмятия и в зоне резания. Первый вариант оценивается как наиболее приемлемый для инженерных расчетов и на его основе получены зависимости для расчета усилий резания наклонными и дисковыми ножами.

Ключевые слова: ножницы, резание, удельная работа, квадратичная, линейная зависимость, усилие, коэффициент вмятия и надреза, математическое моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-531-535

Ножницы для резки проката обеспечивают процесс резания относительным сдвигом частей полосы [1 – 3], и этот процесс имеет периоды вмятия, резания и отрыва (рис. 1).

В период вмятия не происходит относительного сдвига частей полосы, а усилие резания P и касательные сопротивления резанию τ увеличиваются с ростом величины внедрения ножей Z в полосу соответственно до P_{\max} и τ_{\max} . Длительность этого периода определяется коэффициентом вмятия $\xi_v = Z_v/h$, где Z_v – абсолютное внедрение ножей в полосу в конце периода вмятия; h – высота сечения полосы. В период резания происходит сдвиг частей полосы по плоскости резания, и величины P и τ уменьшаются до нуля. Момент начала отрыва характеризуется коэффициентом надреза $\xi_n = Z_n/h$, где Z_n – абсолютное внедрение ножей в полосу в конце периода резания.

Одним из важных энергетических параметров процесса резания является удельная работа сил резания [4 – 6], которая определяется как работа, затрачиваемая на резание образца единичной площади и единичной высоты сечения. Удельная работа (a) обеспечивает выход на расчет усилия резания (P) и мощности резания (N). В работе [4] приведены результаты экспериментальных исследований усилий резания на ножницах с параллельными ножами, которые представлены в виде графических зависимостей $\tau = f(\xi)$ (рис. 1), при этом $\tau = P/F_0$ и $\xi = Z/h$, где F_0 – расчетная (исходная) площадь сечения полосы; ξ – относительное внедрение ножей в полосу. Удельная работа резания определяется

как площадь данного графика. Этот метод не отличается высокой точностью и его использование ограничивается наличием базы экспериментальных данных.

Целью настоящего исследования явилось нахождение аналитических зависимостей удельной работы резания от прочностных и пластических свойств металла разрезаемой полосы, обеспечивающих необходимую точность инженерных расчетов и имеющих достаточно простой вид. В основу этого положены зависимости $P = f(\xi)$ – усилия резания от относительного внедрения ножей. Как показывает эксперимент, эти зависимости имеют различный вид в периоды вмятия и резания и по-

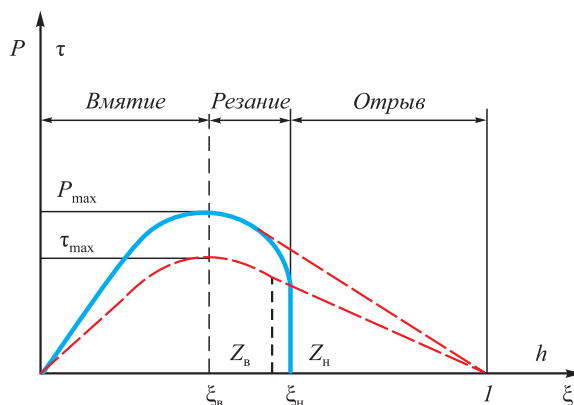


Рис. 1. Характерный вид зависимостей $P = f(\xi)$ и $\tau = f(\xi)$ при резании полосы параллельными ножами

Fig. 1. Typical kind of dependences $P = f(\xi)$ and $\tau = f(\xi)$ when cutting the band with parallel shears

тому для анализа были приняты три варианта их сочетаний: сочетание квадратичной и линейной зависимости (рис. 2, а) и два варианта сочетания квадратичных зависимостей (рис. 2, б, в).

Для всех вариантов можно записать

$$P_{\max} = K\sigma_b F_0 (1 - \xi_b), \quad (1)$$

где K – коэффициент, учитывающий условия работы ножиц и соотношение разрушающих касательных и нормальных напряжений ($K = 0,9 - 1,0$ при холодном резании; $K = 1,0 - 1,1$ при горячем резании [2]); σ_b – предел прочности металла полосы.

Квадратичную функцию $P_b = f(\xi)$ на участке вмятия формируем из условия: $P = 0$ при $\xi = 0$ и $P = P_{\max}$ при $\xi = \xi_b$.

Тогда

$$P_b = P_{\max} \left(\frac{2\xi_b \xi - \xi^2}{\xi_b^2} \right), \quad (2)$$

а с учетом выражения (1) получаем

$$P_b = K\sigma_b F_0 \left(\frac{(1 - \xi_b)(2\xi_b \xi - \xi^2)}{\xi_b^2} \right). \quad (3)$$

Зависимости $P_p = f(\xi)$ на участке резания формируем из условий, что $P = P_{\max}$ при $\xi = \xi_b$ и $P = 0$ при $\xi = 1$.

Тогда можно записать линейную зависимость

$$P_p = P_{\max} \left(\frac{1 - \xi}{1 - \xi_b} \right); \quad (4)$$

квадратичную зависимость

$$P_p = P_{\max} \left(\frac{1 - 2\xi_b - \xi^2 + 2\xi_b \xi}{(1 - \xi_b)^2} \right); \quad (5)$$

с учетом соотношения (1) линейную зависимость

$$P_p = K\sigma_b F_0 (1 - \xi); \quad (6)$$

квадратичную зависимость

$$P_p = K\sigma_b F_0 \left(\frac{1 - 2\xi_b - \xi^2 + 2\xi_b \xi}{(1 - \xi_b)} \right). \quad (7)$$

В варианте сочетания квадратичных зависимостей в первом случае (рис. 2, б) используем зависимости (3) и (7), во втором случае (рис. 2, в) и на участке вмятия, и на участке резания используем зависимость (3). Поскольку эта зависимость есть квадратичная парабола с вершиной в точке $B(\xi_b; P_{\max})$, то этот вариант допустим при условии $\xi_n < 2\xi_b$. Это условие, как показывает анализ экспериментальных данных [2], выполняется при холодном резании.

В соответствии с определением удельной работы сил резания полная работа резания A полосы заданного сечения определяется как

$$A = F_0 h a. \quad (8)$$

Элементарная работа сил резания dA при прохождении ножами элементарного расстояния dZ запишется в виде соотношения

$$dA = P(\xi) h d\xi, \quad (9)$$

где $d\xi = dZ/h$ – элементарное относительное внедрение ножей.

Дифференцируя выражение (8) и рассматривая совместно с соотношением (9), находим

$$da = \frac{P(\xi)}{F_0} d\xi,$$

где da – дифференциал удельной работы сил резания.

В итоге получаем

$$a = \frac{1}{F_0} \int_{\xi} P(\xi) d\xi. \quad (10)$$

Пределы интегрирования для первых двух вариантов следующие: $0 < \xi < \xi_b$ – на участке вмятия; $\xi_b < \xi < \xi_n$ – на участке резания; для третьего варианта $0 < \xi < \xi_n$.

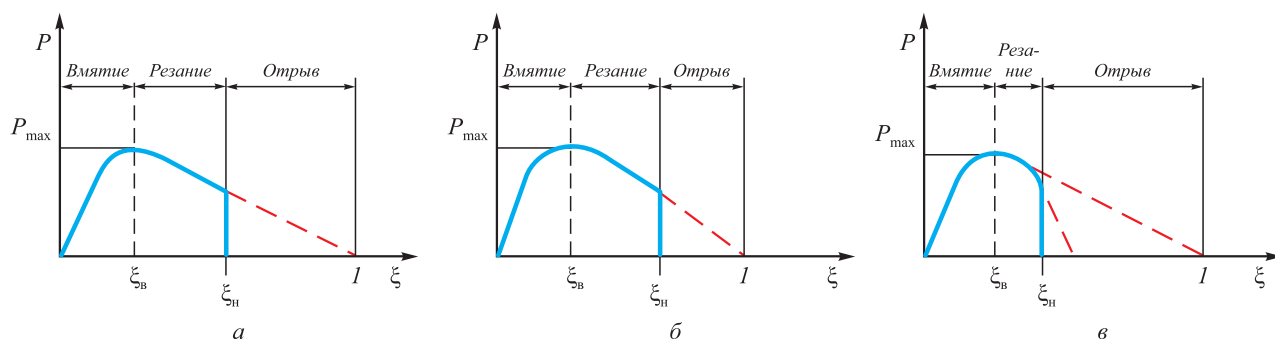


Рис. 2. Варианты сочетания зависимостей $P = f(\xi)$

Fig. 2. Variants of $P = f(\xi)$ dependences combinations

Интегрируя выражение (10) в указанных пределах при принятых сочетаниях зависимостей $P = f(\xi)$, находим величину a .

Сочетание квадратичной (3) и линейной зависимости (6) дает соотношение

$$a = \frac{1}{F_0} \left[\frac{K\sigma_B F_0}{\xi_B^2} (1 - \xi_B) \int_0^{\xi_B} (2\xi_B \xi - \xi^2) d\xi + K\sigma_B F_0 \int_{\xi_B}^{\xi_H} (1 - \xi) d\xi \right] = \frac{K\sigma_B}{6} (6\xi_H - 3\xi_H^2 - 2\xi_B - \xi_B^2). \quad (11)$$

Сочетание квадратичных зависимостей (3) и (7) дает следующее соотношение:

$$a = \frac{1}{F_0} \left[\frac{K\sigma_B F_0}{\xi_B^2} (1 - \xi_B) \int_0^{\xi_B} (2\xi_B \xi - \xi^2) d\xi + \frac{K\sigma_B F_0}{1 - \xi_B} \int_{\xi_B}^{\xi_H} (1 - 2\xi_B - \xi^2 - 2\xi_B \xi) d\xi \right] = \frac{K\sigma_B}{3(1 - \xi_B)} (3\xi_H - 6\xi_B \xi_H - \xi_H^3 + 3\xi_B \xi_H^2 + 2\xi_B^2 - \xi_B^3). \quad (12)$$

С использованием зависимости (3) на участке вмятия и на участке резания получаем

$$a = \frac{1}{F_0} \left[\frac{1 - \xi_B}{\xi_B^2} K\sigma_B F_0 \int_P^{\xi_B} (2\xi_B \xi - \xi^2) d\xi \right] = \frac{1 - \xi_B}{\xi_B^2} K\sigma_B \left(\xi_B \xi_H^2 - \frac{\xi_H^3}{3} \right) = \frac{1 - \xi_B}{\xi_B^2} K\sigma_B (3\xi_B \xi_H^2 - \xi_H^3). \quad (13)$$

Полученные зависимости (11), (12) и (13) для расчета удельной работы резания имеют одну структуру: $a = K\sigma_B m$, где параметр $m = f(\xi_B, \xi_H)$ учитывает пластические свойства материала полосы.

В зависимости (11)

$$m_1 = \frac{6\xi_H - 3\xi_H^2 - 2\xi_B - \xi_B^2}{6}; \quad (14)$$

в зависимости (12)

$$m_2 = \frac{3\xi_H - 6\xi_B \xi_H - \xi_H^3 + 3\xi_B \xi_H^2 + 2\xi_B^2 - \xi_B^3}{3(1 - \xi_B)}; \quad (15)$$

в зависимости (13)

$$m_3 = \frac{(1 - \xi_B)(3\xi_B \xi_H^2 - \xi_H^3)}{3\xi_B^2}. \quad (16)$$

Степень соответствия этих зависимостей действительным условиям резания будет определять точность расчетов удельной работы резания и связанных с ней расчетов силовых параметров. Для сравнительной оценки величин m_1 , m_2 и m_3 выполнены расчеты при характерных соотношениях ξ_B и ξ_H [2] для горячего и холодного резания металлов (см. таблицу).

При горячем резании всегда $\xi_H > 2\xi_B$ [2] и потому для расчета удельной работы используем зависимости (14) и (15).

Из таблицы видно, что значения m_2 превышают m_1 и это превышение достигает 17 %. Разница ($m_2 - m_1$) тем больше, чем больше разница ($\xi_H - \xi_B$).

Этот результат объясним тем, что на участке вмятия кривые резания $P = f(\xi)$ совпадают, а на участке резания очевидно, что на графике парабола (7), используемая во втором варианте, лежит выше прямой (6), используемой в первом варианте. В итоге площадь графика между линиями (6) и (3) в зоне вмятия соответствует разнице удельной работы, определяемой соответственно зависимостями (11) и (12).

Если допустить, что действительная кривая резания на участке вмятия находится в зоне между линиями (3) и (7), то для расчета удельной работы при горячем резании можно использовать более простую зависимость (11) с поправочным коэффициентом β .

$$a = \frac{\beta K\sigma_B}{6} (6\xi_H - 3\xi_H^2 - 2\xi_B - \xi_B^2). \quad (17)$$

Учитывая соотношение параметров m_1 и m_2 (см. таблицу), можно принять: $\beta = 1,06$ при $(\xi_H - \xi_B) < 0,5$ и $\beta = 1,09$ при $(\xi_H - \xi_B) > 0,5$.

Результаты расчетов величин $m = f(\xi_B, \xi_H)$

Results of calculations of $m = f(\xi_B, \xi_H)$

Горячее резание				Холодное резание				
ξ_H	ξ_B	m_1 (14)	m_2 (15)	ξ_H	ξ_B	m_1 (14)	m_2 (15)	m_3 (16)
0,85	0,30	0,3737	0,4457	0,25	0,20	0,1454	0,1466	0,1460
0,85	0,35	0,3516	0,4125	0,30	0,20	0,1816	0,1862	0,1800
0,95	0,35	0,3616	0,4309	0,35	0,25	0,1950	0,1995	0,1960
0,90	0,30	0,3800	0,4571	0,40	0,25	0,2264	0,2360	0,2240
0,90	0,35	0,3500	0,4235	0,45	0,30	0,2338	0,2434	0,2359
0,70	0,30	0,3400	0,3895	0,50	0,35	0,2379	0,2474	0,2432

При холодном резании $\xi_n > 2\xi_b$ [2] и потому для расчета удельной работы можно использовать зависимости (11) – (13). Из таблицы видно, что разница величин m_1 , m_2 и m_3 не превышает 5 %. С учетом этого для расчета удельной работы при холодном резании рекомендуется также более простая зависимость (17) с условием, что $\beta = 1$.

В итоге с учетом зависимости (8) полная работа сил резания полосы заданного сечения составит

$$A = \frac{\beta K \sigma_b F_0 h}{6} (6\xi_n - 3\xi_n^2 - 2\xi_b - \xi_b^2); \quad (18)$$

мощность сил резания (N) будет

$$N = \frac{\beta K \sigma_b F_0 h}{6t_p} (6\xi_n - 3\xi_n^2 - 2\xi_b - \xi_b^2), \quad (19)$$

где t_p – время резания.

Наиболее прост переход от удельной работы резания к усилию резания для ножниц с наклонными ножами и дисковых, обеспечивающих резание листов при постоянном усилии. В этих случаях

$$P = \frac{A}{S} = \frac{F_0 h a}{S}, \quad (20)$$

где S – ход ножей.

Для ножниц с наклонными ножами $F_0 = bh$ и $S = b(\operatorname{tg} \varphi)$, где b – ширина листа; φ – угол наклона ножей.

Тогда с учетом зависимости (17) запишем

$$P = \frac{\beta K \sigma_b h^2}{6\operatorname{tg} \varphi} (6\xi_n - 3\xi_n^2 - 2\xi_b - \xi_b^2). \quad (21)$$

Зависимость (21) совпадает с зависимостью, приведенной в работе [7]. Там она получена другим способом и проведена экспериментально. Этим подтверждается правильность выбора зависимости (17) для расчета удельной работы резания.

Резание дисковыми ножами можно рассматривать как резание наклонными ножами [1; 2] при условии, что дуги контакта ножей и листа заменяем хордами с углом наклона φ и что каждый нож (из двух) разрезает площадь сечения листа $F_0 = Lh/2$ и проходит условное расстояние $S = L(\operatorname{tg} \varphi)$, где L – длина листа. В итоге, с учетом формулы (17) получаем

$$P = \frac{\beta K \sigma_b h^2}{12\operatorname{tg} \varphi} (6\xi_n - 3\xi_n^2 - 2\xi_b - \xi_b^2). \quad (22)$$

Выводы. В результате математического моделирования процесса резания параллельными ножницами и сопоставимого анализа вариантов моделирования получена зависимость удельной работы сил резания от прочностных и пластических свойств металла разрезаемой полосы, обеспечивающая необходимую точность инженерных расчетов. На базе этой зависимости выполнен переход к расчету усилий резания наклонными и дисковыми ножами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Королев А.А. Конструкции и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1985. – 376 с.
2. Королев А.А. Механические оборудования прокатных цехов черной и цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1976. – 544 с.
3. 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.
4. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. – М.: Металлургиздат, 1958. – 432 с.
5. Потапенков А.П., Чернобай В.М., Пилипенко С.С., Никоноров Л.В. Удельная работа и силовые параметры при резании проката ножницами. – В кн.: Непрерывные процессы обработки давлением: Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова, (14-15 апреля 2004 г.). – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 215 – 219.
6. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.И. Гребенник и др. – М.: Металлургия, 1981. – 576 с.
7. Потапенков А.П. Исследование усилий резания наклонными ножами // Изв. вуз. Черная металлургия, 1998. № 8. С. 65 – 69.
8. Механическое оборудование заводов цветной металлургии. В 3-х частях. Ч. 3. Механическое оборудование цехов по обработке цветных металлов/ А.А. Королев, А.Г. Навроцкий, В.А. Вердеревский и др. – М.: Металлургия, 1989. – 624 с.
9. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – М.: Машиностроение. 1979. – 520 с.
10. Королев А.А. Конструкции и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1969. – 464 с.
11. Паршин В.С. Машины и агрегаты для обработки цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.
12. Химич Г.Л. Механическое оборудование цехов холодной прокатки. – М.: Машиностроение, 1972. – 455 с.
13. Берман С.И. Прокатка листов и лент из тяжелых цветных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 266 с.
14. Потапенков А.П., Миняков О.В., Чернобай В.М. Оценка усилий резания наклонными ножами: Строительство. Механика. Сб. научн. трудов. – Норильск: изд. Норильского индустриального института, 1985. С. 59 – 64.
15. Терентьев В.С., Цалюк М.Б. Адыютаж технолистических станов. Отделочные машины. – Свердловск: Металлургиздат, 1961. – 344 с.

Поступила 18 сентября 2015 г.

SPECIFIC WORK OF POWERS FOR ROLLED METAL CUTTING WITH SCISSORS

S.S. Pilipenko, M.R. Baiguzin, A.P. Potapenkov

Norilsk Industrial Institute, Russia, Norilsk

Abstract. The article presents the conclusions and analysis results of three variants of specific cutting works analytical dependences from durable and plastic properties of cut band materials which are characterized by the limit of strength and coefficients of indentation and incision. The conclusions are based on three accepted combinations of cutting effort dependences from relative intromission of knives into the band, thus characterizing periods of indentation and cutting. Combinations of quadratic and linear dependences, two quadratic ones and the use of one of the quadratic dependence in the zone of indentation and in the zone of cutting were investigated. The first variant is considered to be the most acceptable one for engineering calculations. On its base there were received dependences for cutting effort calculation by means of inclined and disk-shaped knives.

Keywords: scissors, cutting, specific work, quadratic, linear dependence, effort, coefficient, indentation, incision, mathematical modeling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-531-535

REFERENCES

1. Korolev A.A. *Konstruktsii i raschet mashin i mekhanizmov prokatnykh stanov* [Constructions and calculation of machines and mechanisms of rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 376 p. (In Russ.).
2. Korolev A.A. *Mekhanicheskie oborudovaniya prokatnykh tsekhov chernoi i tsvetnoi metallurgii* [Mechanical equipment of rolling-mill shops in ferrous and non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 544 p. (In Russ.).
3. Lukashkin N.D., Kokhan L.S., Yakushev A.N. *Konstruktsii i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: Uchebnik dlya vuzov* [Constructions and calculation of machines and sets of metallurgical plants: Text-book for universities]. Moscow: NKTs, 2003, 436 p. (In Russ.).
4. Tselikov A.I., Smirnov V.V. *Prokatnye stany* [Rolling mills]. Moscow: Metallurgizdat, 1958, 432 p. (In Russ.).
5. Potapenkov A.P., Chernobai V.M., Pilipenko S.S., Nikonorov L.V. Specific work and force parameters when cutting rolled metal with scissors. In.: *Nepreryvnye protsessy obrabotki davleniem: Trudy Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A.I. Tselikova* [Continuous processes of forming: Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conf., devoted to the 100th Anniversary of Academician A.I. Tselikov]. Moscow: izd. MGGU im. N.E. Bauman, 2004, pp. 215–219. (In Russ.).
6. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebennik V.I. etc. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3-kh tomakh. T. 3. Mashiny i agregaty dlya otdelki prokata* [Machines and units of metallurgical plants. In 3 vols. Vol. 3. Machines and units for conditioning of rolled metal]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 576 p. (In Russ.).
7. Potapenkov A.P. Research of cutting force of inclined throat shears. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998, no. 8, pp. 65–69. (In Russ.).
8. Korolev A.A., Navrotskii A.G., Verderevskii V.A. etc. *Mekhanicheskoe oborudovanie zavodov tsvetnoi metallurgii. V 3-kh chastyakh. Ch. 3. Mekhanicheskoe oborudovanie tsekhov po obrabotke tsvetnykh metallov* [Mechanical equipment of plants of non-ferrous metallurgy. In 3 parts. Part 3. Mechanical equipment of the shops on the non-ferrous metals treatment]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 624 p. (In Russ.).
9. Romanovskii V.P. *Spravochnik po kholodnoi shtampovke* [Reference book on cold forming]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 520 p. (In Russ.).
10. Korolev A.A. *Konstruktsii i raschet mashin i mekhanizmov prokatnykh stanov* [Constructions and calculation of machines and mechanisms of rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 464 p. (In Russ.).
11. Parshin V.S. *Mashiny i agregaty dlya obrabotki tsvetnykh metallov i splavov* [Machines and sets for the treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 400 p. (In Russ.).
12. Khimich G.L. *Mekhanicheskoe oborudovanie tsekhov kholodnoi prokatki* [Mechanical equipment of the cold-forming shops]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1972, 455 p. (In Russ.).
13. Berman S.I. *Prokatka listov i lent iz tyazhelykh tsvetnykh metallov* [Rolling of bands and sheets from heavy non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 266 p. (In Russ.).
14. Potapenkov A.P., Minyakov O.V., Chernobai V.M. Estimation of cutting forces with inclined throat shears. In: *Stroitel'stvo. Mekhanika. Sb. nauchn. trudov* [Building. Mechanics. Collected scientific papers]. Norilsk: Noril'skii industrial'nyi institut, 1985, pp. 59–64. (In Russ.).
15. Terent'ev V.S., Tsalyuk M.B. *Ad'yustazh tekhnologicheskikh stanov. Otdelochnye mashiny* [Auxiliaries of technorolling mills. Finishing machines]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1961, 344 p. (In Russ.).

Information about the authors:

S.S. Pilipenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Chair "Processing Machinery and Equipment" (pilipenko@norvuz.ru)

M.R. Baiguzin, Assistant of the Chair "Processing Machinery and Equipment"

A.P. Potapenkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Processing Machinery and Equipment"

Received September 15, 2015