

УДК 621.923

© Кленов О.С.<sup>1</sup>, Новиков Ф.В.<sup>2</sup>, Андилахай В.А.<sup>3</sup>**ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ТРЕНИЯ В ОБЩЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ**

Приведены аналитические зависимости для определения составляющих силы резания, возникающих при точении на передней и задней поверхностях резца, с учетом процессов резания и трения. Показано существование минимума радиальной составляющей силы резания в зависимости от коэффициента трения. Произведена оценка энергий резания и трения в общем энергетическом балансе механической обработки резанием и определены условия уменьшения энергии трения.

**Ключевые слова:** энергетический баланс, энергия трения, механическая обработка резанием, резец, сила резания, коэффициент трения, температура резания.

**Кленов О.С., Новиков Ф.В., Андилахай В.О. Оцінювання енергії тертя в загальному енергетичному балансі механічної обробки різанням.** Наведено аналітичні залежності для визначення складових сили різання, що виникають при точінні на передній і задній поверхнях різця, з урахуванням процесів різання і тертя. Показано існування мінімуму радіальної складової сили різання залежно від коефіцієнта тертя. Виконано оцінювання енергії різання і тертя в загальному енергетичному балансі механічної обробки різанням і визначеної умови зменшення енергії тертя.

**Ключові слова:** енергетичний баланс, енергія тертя, механічна обробка різанням, різець, сила різання, коефіцієнт тертя, температура різання.

**O.S. Klenov, F.V. Novikov, V.O Andilahay. Evaluation of friction energy in the overall energy balance of machining.** The analytical relations that make it possible to determine the components of the cutting forces arising during the turning on the front and rear surfaces of the cutter and take into account the friction and cutting processes have been defined. It has been shown that taking into account the friction of the rear surface of the cutting tool against the material being cut results in the existence of minimum of the radial component of the cutting force as a function of the friction coefficient. In this case the minimum of the radial component of the cutting force is shifted towards the lower values of the friction coefficient with decreasing intensity, and increasing the rake (including both positive and negative values), which is true for both cutting and abrasive treatment. On the basis of analytical relationships cutting and friction energy in the overall energy balance of machining have been evaluated and the conditions to reduce the friction energy have been defined. The reliability of the theoretical solutions has been confirmed experimentally. It has been stated that with the cutting speed increase in turning the tangential and radial components relation increases due to the decrease in the intensity of friction on the rear surface of the cutting tool. As this takes place the angle of action that is equal to the difference of the conventional angle of friction of the material being cut and the front surface of the cutting tool and the rake angle decreases. This shows that the friction coefficient decreases with the increase in cutting speeds due to increasing temperature and cutting power in the overall energy balance of the turning process. Practical recommendations to improve the efficiency of the machining by reducing frictional energy have been made. The technique of computational and experimental determination of the parameters of the power intensity of the cutting process has been offered.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, директор, ООО «ДиМерус Инженеринг», г. Харьков, [dimerus@dimerus.com](mailto:dimerus@dimerus.com)

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков, [fokusnic1@rambler.ru](mailto:fokusnic1@rambler.ru)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [Andilahay@mail.ru](mailto:Andilahay@mail.ru)

**Keywords:** energy balance, friction energy, machining, cutting tool, cutting force, friction coefficient, the cutting temperature.

**Постановка проблеми.** Общеизвестно, что одним из основных условий повышения эффективности механической обработки резанием является снижение интенсивности трения режущего инструмента с обрабатываемой деталью. Это обеспечивает уменьшение силы и температуры резания, повышение производительности, стойкости режущего инструмента, качества и точности обрабатываемых поверхностей. В настоящее время накоплен значительный практический опыт решения задачи снижения трения в процессе резания, связанный с применением эффективных конструкций режущих инструментов, инструментальных материалов, технологических сред и т.д. Однако в научно-технической литературе не приведены методики раздельной оценки энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса резания, что не позволяет научно обоснованно подойти к решению задачи снижения интенсивности трения в зоне резания до минимально возможного уровня. В связи с этим в работе предложен новый подход к решению указанной выше задачи.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Традиционно энергетический баланс механической обработки резанием оценивают на основе экспериментального определения составляющих силы резания и соотношений между ними с учетом коэффициента трения сходящей стружки с передней поверхности инструмента [1-3]. Однако при этом не удается раздельно определить доли энергий резания и трения, возникающих на передней и задней поверхностях инструмента, в общем энергетическом балансе механической обработки резанием. Это не позволяет раздельно определить составляющие силы резания, действующие на передней и задней поверхностях инструмента, и на этой основе установить наиболее перспективные направления снижения интенсивности трения в зоне резания, что особенно важно при обработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Поэтому научными предпосылками решения данной задачи следует рассматривать результаты исследований [4, 5], в которых предложены подходы раздельной оценки энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования и которые могут быть использованы при лезвийной обработке резанием.

**Цель работы** – повышение эффективности механической обработки резанием на основе анализа составляющих силы резания, обусловленных процессами резания и трения, возникающих на передней и задней поверхностях режущего инструмента.

**Изложение основного материала.** При резании металла лезвийным инструментом, например, при точении, трение резца с обрабатываемым металлом происходит по его передней и задней поверхностям. Для математического описания этой закономерности в работе [6] тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания резцом с нулевым передним углом ( $\gamma = 0$ ) представлены следующим образом:

$$P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}} = P_{z_{рез}} \cdot \left( 1 + \frac{P_{z_{тр}}}{P_{z_{рез}}} \right); \quad (1)$$

$$P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{тр}} = f \cdot P_{z_{рез}} + \frac{P_{z_{тр}}}{f} = P_{z_{рез}} \cdot \left( f + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{z_{тр}}}{P_{z_{рез}}} \right), \quad (2)$$

где  $P_{z_{рез}}$ ,  $P_{y_{рез}}$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, возникающие на передней поверхности резца, Н;  $P_{z_{тр}}$ ,  $P_{y_{тр}}$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, возникающие на задней поверхности резца вследствие трения обрабатываемого материала с площадкой износа, образующейся на задней поверхности резца, Н;  $f$  – коэффициент трения.

Из зависимости (2) вытекает, что коэффициент трения  $f$  резца с обрабатываемым металлом неоднозначно влияет на радиальную  $P_y$  составляющую силы резания, т. е. существует экстремум функции  $P_y$  от  $f$ . Для определения экстремального значения коэффициента трения  $f$  следует зависимость (2) подчинить необходимому условию экстремума:  $(P_y)_f = 0$ . В ре-

зультате получено:

$$(P_y)'_f = 1 - \frac{1}{f^2} \cdot \frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{pez}}} = 0. \quad (3)$$

Отсюда определяется экстремальное значение коэффициента трения

$$f_{экстр} = \sqrt{\frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{pez}}}}. \quad (4)$$

Определим характер экстремума функции  $P_y$  от  $f$ . Для этого следует установить знак второй производной функции  $P_y$  от  $f$  в точке ее экстремума. После преобразований зависимости (3) получено:

$$(P_y)''_f = \frac{2}{f^3} \cdot \frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{pez}}} > 0. \quad (5)$$

Как видно, вторая производная функции  $P_y$  от  $f$  в точке ее экстремума принимает положительное значение. Следовательно, имеет место минимум функции  $P_y$  от  $f$ . Поэтому при выборе оптимального значения коэффициента трения  $f$  необходимо исходить из условия (4): чем меньше отношение  $P_{z_{mp}}/P_{z_{pez}}$ , тем меньше должен быть коэффициент трения  $f$ .

Радиальная  $P_y$  составляющая силы резания в этом случае, после подстановки зависимости (4) в (2), принимает вид:

$$(P_y)_{min} = 2 \cdot \sqrt{P_{z_{pez}} \cdot P_{z_{mp}}}. \quad (6)$$

Из зависимости (6) следует, что минимальное значение радиальной  $P_y$  составляющей силы резания определяется произведением составляющих силы резания  $P_{z_{pez}}$  и  $P_{z_{mp}}$ , которые в одинаковой степени влияют на  $P_y$ . Уменьшая  $P_{z_{mp}}$  до нуля, можно уменьшить до нуля значение  $(P_y)_{min}$ . В этом случае  $f_{экстр} = 0$ , а тангенциальная составляющая силы резания  $P_z = P_{z_{pez}}$ . Как известно, добиться наименьшего значения коэффициента трения  $f$  можно. Для этого необходимо использовать в качестве инструментального материала алмаз или другие сверхтвердые материалы, которые характеризуются наименьшим коэффициентом трения с обрабатываемыми металлами.

В случае положительного переднего угла реза ( $\gamma > 0$ ) отношение  $P_{z_{pez}}/P_{y_{pez}} = ctg(\psi - \gamma)$ , где  $(\psi - \gamma)$  – угол действия;  $\psi$  – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью реза ( $tg\psi = f$  – коэффициент трения) [5]. После тригонометрических преобразований имеем:

$$\frac{P_{z_{pez}}}{P_{y_{pez}}} = ctg(\psi - \gamma) = \frac{(1 + f \cdot tg\gamma)}{(f - tg\gamma)}. \quad (7)$$

Отсюда

$$P_{y_{pez}} = P_{z_{pez}} \cdot \left( \frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} \right). \quad (8)$$

В результате подстановки зависимости (8) в (2), получено:

$$P_y = P_{z_{pez}} \cdot \left( \frac{f - tg\gamma}{1 + f \cdot tg\gamma} + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{pez}}} \right). \quad (9)$$

В данном случае, как и в зависимости (2), коэффициент трения  $f$  неоднозначно влияет на радиальную  $P_y$  составляющую силы резания, т.е. существует экстремум функции  $P_y$  от  $f$ .

Для определения экстремального значения коэффициента трения  $f$  следует зависимость (9) подчинить необходимому условию экстремума:  $(P_y)'_f = 0$ . Тогда

$$(P_y)'_f = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}{(1 + f \cdot \operatorname{tg} \gamma)^2} - \frac{1}{f^2} \cdot \frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{рез}}} = 0. \quad (10)$$

После преобразований получено уравнение:

$$\left( \frac{f}{\cos \gamma + f \cdot \sin \gamma} \right)^2 = \frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{рез}}}. \quad (11)$$

Откуда получено экстремальное значение коэффициента трения

$$f_{\text{экстр}} = \frac{\cos \gamma}{\left( \sqrt{\frac{P_{z_{рез}}}{P_{z_{mp}}} - \sin \gamma} \right)}. \quad (12)$$

Для оценки характера экстремума функции  $P_y$  от  $f$  определим знак второй производной функции  $P_y$  от  $f$  в точке ее экстремума:

$$(P_y)''_f = -\frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \gamma) \cdot \operatorname{tg} \gamma}{(1 + f \cdot \operatorname{tg} \gamma)^4} + \frac{2}{f^3} \cdot \frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{рез}}}. \quad (13)$$

При условии  $\gamma = 0$  вторая производная  $(P_y)''_f = \frac{2}{f^3} \cdot \frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{рез}}} > 0$ , т.е. в результате приходим

к зависимости (5).

С увеличением переднего угла реза  $\gamma$  первое слагаемое зависимости (13) принимает отрицательное значение и определяется множителем  $\operatorname{tg} \gamma$ , который для  $\gamma = 0 \dots 20^\circ$  принимает значения, меньшие второго слагаемого зависимости (13). Из этого можно сделать вывод, что вторая производная функции  $P_y$  от  $f$  в точке ее экстремума принимает положительное значение. Следовательно, имеет место минимум функции  $P_y$  от  $f$ .

Анализ зависимости (12) показывает, что при условии  $\gamma = 0$  справедливо соотношение

$$f_{\text{экстр}} = \sqrt{\frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{рез}}}}. \text{ Это соответствует зависимости (4) для условия } \gamma = 0. \text{ Следовательно, расче-}$$

ты выполнены правильно.

С увеличением отношения  $P_{z_{рез}} / P_{z_{mp}}$  коэффициент трения  $f_{\text{экстр}}$  уменьшается до зна-

$$\text{чения } f_{\text{экстр}} = \sqrt{\frac{P_{z_{mp}}}{P_{z_{рез}}}}. \text{ Очевидно, при } P_{z_{mp}} = 0 \text{ справедливо условие } f_{\text{экстр}} = 0.$$

Поскольку отношение  $P_{z_{рез}} / P_{z_{mp}} > 1$ , то тригонометрическая функция  $\sin \gamma$ , входящая в знаменатель зависимости (12), будет несущественно влиять на изменение коэффициента трения  $f_{\text{экстр}}$ . В связи с этим, с увеличением положительного переднего угла реза  $\gamma$  коэффициента трения  $f_{\text{экстр}}$  будет уменьшаться.

Для отрицательного переднего угла реза ( $\gamma < 0$ ) зависимость (12) примет вид:

$$f_{\text{экстр}} = \frac{\cos \gamma}{\left( \sqrt{\frac{P_{z_{рез}}}{P_{z_{mp}}} + \sin \gamma} \right)}. \quad (14)$$

В данном случае с увеличением отрицательного переднего угла резца  $\gamma$  функция  $\cos \gamma$  будет уменьшаться, а функция  $\sin \gamma$ , наоборот, будет увеличиваться. Это приведет к уменьшению коэффициента трения  $f_{экстр}$ , чем можно объяснить эффективность применения сверхтвердых абразивных материалов в качестве инструментальных материалов при изготовлении шлифовальных кругов, у которых передний угол режущих зерен всегда отрицательный.

Необходимо отметить, что экстремальный характер функции  $P_y$  от  $f$  справедлив при условии образования на задней поверхности резца площадки износа из-за наличия второго слагаемого в зависимости (2). Очевидно, по мере увеличения площадки износа отношение  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}}$  будет увеличиваться, вызывая рост  $P_y$ , поскольку первое слагаемое зависимости (2) будет оставаться фактически постоянным.

Для оценки силовой напряженности процесса резания целесообразно использовать зависимость для определения отношения  $P_z / P_y$ , которая для условия  $\gamma = 0$  принимает вид:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{\left(1 + \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}}\right)}{\left(f + \frac{1}{f} \cdot \frac{P_{z_{мп}}}{P_{z_{рез}}}\right)}. \quad (15)$$

Как видно, отношение  $P_z / P_y$  отличается от коэффициента трения  $f$  и может быть с ним сопоставимо лишь при условии  $P_{z_{мп}} / P_{z_{рез}} \rightarrow 0$ , т. е. фактически при отсутствии трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом.

Второе слагаемое в знаменателе зависимости (15) может быть больше числителя. В этом случае отношение  $P_z / P_y < 1$ , что указывает на чрезвычайно высокую силовую напряженность процесса резания. Следовательно, в формировании силовой напряженности процесса резания преобладает процесс стружкообразования, хотя и интенсивность трения в зоне резания в ряде случаев может быть сопоставима с интенсивностью съема металла. Таким образом, по соотношению значений первого и второго слагаемых в знаменателе зависимости (15) можно оценить доли энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса резания.

Полученные теоретические решения хорошо согласуются с экспериментальными данными [7] для составляющих силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  при точении в зависимости от скорости резания  $V$  в диапазоне значений от 10 до 120 м/мин (рис.), а также с учетом отношения  $P_z / P_y$ , в котором нормальная составляющая рассматривается при условии косоугольного резания как величина  $\sqrt{P_y^2 + P_x^2}$  (табл.) вместо  $P_y$ .

Как следует из таблицы, отношение  $P_z / P_y$  с увеличением скорости резания  $V$  увеличивается, принимая довольно большие значения. В соответствии с зависимостью (15), это объясняется небольшим значением второго слагаемого, входящего в знаменатель этой зависимости, т.к. в противном случае отношение  $P_z / P_y$  принимало бы небольшие значения – на уровне  $P_z / P_y \rightarrow 1$  и менее. Из этого вытекает, что силовая напряженность процесса резания в данном случае обусловлена в основном процессом стружкообразования, т.к. интенсивность трения в зоне резания незначительна.

В особой мере данная закономерность проявляется с увеличением скорости резания  $V$ . Исходя из зависимости (15) можно сделать вывод о том, что это происходит вследствие уменьшения первого слагаемого в знаменателе этой зависимости (коэффициента трения  $f$ ), поскольку в противном случае увеличилось бы второе слагаемое в знаменателе и, соответственно, уменьшилось бы отношение  $P_z / P_y$ .

Таким образом, используя аналитическую зависимость (15), можно анализировать законо-

мерности изменения отношения  $P_z/P_y$ , что позволяет раскрыть физическую сущность процесса резания и оценить роль трения в формировании силовой напряженности процесса резания.

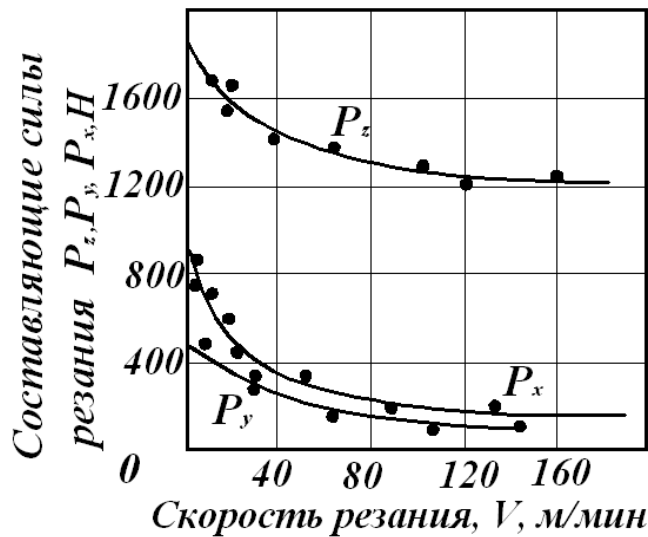


Рисунок – Влияние скорости резания  $V$  на составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  при точении титанового сплава ВТ1;  $\varphi = 70^\circ$ ;  $t = 2,5$  мм;  $S = 0,47$  мм/об [7]

Таблица

Значения отношения  $P_z/P_y$  и угла действия  $(\psi - \gamma)$

$V$ , м/мин	20	40	80	120
$P_z/P_y$	3	4,4	5,4	7
$(\psi - \gamma)$ , °	18	13	10	8

Учитывая незначительное влияние второго слагаемого в знаменателе зависимости (15) на отношение  $P_z/P_y$ , можно приближенно определить изменение коэффициента трения  $f = tg\psi$  с увеличением скорости резания  $V$  (рис.), используя известную аналитическую зависимость  $P_{z\text{рез}}/P_{y\text{рез}} = ctg(\psi - \gamma)$  [5] и рассматривая в ней  $P_{z\text{рез}}/P_{y\text{рез}} \approx P_z/P_y$  (табл.). Так, расчетно-экспериментальным методом установлено, что угол действия  $(\psi - \gamma)$  непрерывно уменьшается с увеличением скорости резания  $V$ . Это связано с уменьшением условного угла трения  $\psi$  (т.к. передний угол резца  $\gamma$  остается постоянным) по причине увеличения температуры резания. В результате коэффициент трения  $f = tg\psi$  образующейся стружки с передней поверхностью резца уменьшается. Из этого вытекает, что уменьшение силы резания происходит по причине уменьшения угла действия  $(\psi - \gamma)$ . Этот вывод открывает новые перспективы снижения силовой напряженности процесса резания, повышения производительности и качества обработки.

**Выводы**

Получены аналитические зависимости для определения составляющих силы резания, возникающих при точении на передней и задней поверхностях резца, с учетом процессов резания и трения. Показано, что учет трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом приводит к существованию минимума радиальной составляющей силы резания в зависимости от коэффициента трения. При этом минимум радиальной составляющей силы резания смещается в область меньших значений коэффициента трения с уменьшением интенсивности

трения. На основе полученных аналитических зависимостей произведена оценка энергий резания и трения в общем энергетическом балансе механической обработки резанием и определены условия уменьшения энергии трения. Достоверность теоретических решений подтверждена экспериментально. Установлено, что с увеличением скорости резания при точении отношение тангенциальной и радиальной составляющих силы резания увеличивается в связи с уменьшением интенсивности трения на задней поверхности резца. При этом угол действия, равный разности условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью резца и переднего угла резца, уменьшается. Это указывает на уменьшение коэффициента трения вследствие увеличения температуры резания и повышения энергии резания в общем энергетическом балансе процесса точения. Даны практические рекомендации по повышению эффективности осуществления механической обработки резанием.

#### Список использованных источников:

1. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М. : Высшая школа, 1985. – 304 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 343 с.
3. Филоненко С.Н. Резание металлов / С.Н. Филоненко. – К. : Вища школа, 1969. – 260 с.
4. Алмазная обработка : учебное пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – К. : ИЗМН, 1996. – 168 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с. – (Механика резания материалов : в 10-ти т.; Т. 1).
6. Новиков Ф.В. Определение сил резания, действующих на передней и задней поверхностях резца / Ф.В. Новиков, О.С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ» : Зб. наук. пр. Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 5(1177). – С. 81-86.
7. Полетика М.Ф. Исследование процесса резания титановых сплавов / М.Ф. Полетика // Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов. – Куйбышев : Куйбышевское областное книжное издательство, 1962. – С. 28-35.

#### Bibliography:

1. Granovsky G.I. Metal Cutting : the textbook / G.I. Granovsky, V.G. Granovsky. – M. : Vysshaya shkola, 1985. – 304 p. (Rus.)
2. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of cutting metal / V.F. Bobrov. – M. : Mashinostroenie, 1975. – 343 p. (Rus.)
3. Filonenko S.N. Cutting metal / S.N. Filonenko. – K. : Vishcha shkola, 1969. – 260 p. (Rus.)
4. Diamond Processing : textbook / A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov, A.A. Yakimov. – K. : IZMN, 1996. – 168 p. (Rus.)
5. Physical and mathematical theory of materials processing technology and mechanical engineering-eniya / Edited by F.V. Novikov and A.V. Yakimov. – Odessa : ONPU, 2002. – 580 p. – (Cutting Mechanics of Materials : In 10 vols.; V. 1). (Rus.)
6. Novikov F.V. Determination of cutting forces acting on the front and back surfaces of the cutter / F.V. Novikov, O.S. Klenov // Reporter of the NTU «KhPI» : Collection of scientific works. Section : Technology in Engineering. – Kharkiv.: NTU «KhPI». – 2016. – № 5(1177). – P. 81-86. (Rus.)
7. Poletika M.F. Investigation of the process of cutting titanium alloys / M.F. Poletika // The machinability of heat-resistant and titanium alloys. – Kuibyshev : Kuibyshev regiontion Publishing House, 1962. – P. 28-35. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.06.2016