

# Дослідження процесів обробки

---

УДК 621.941

**Н. Е. Стахнив, Л. Н. Девин\***

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля  
НАН Украины, г. Киев, Украина

\**ldevin@ism.kiev.ua*

## **Влияние скорости резания на температуру и силы при чистовом точении цветных сплавов резцами с круглыми алмазно-твердосплавными пластинами**

*Установлены закономерности изменения температуры, силы резания и шероховатости обработанной поверхности для различных скоростей резания при чистовом точении сплавов алюминия и латуни резцом с алмазно-твердосплавной пластиной.*

**Ключевые слова:** *точение, алюминиевые сплавы, латунь, алмазно-твердосплавные пластины, температура резания, сила резания, шероховатость.*

Цветные сплавы широко используют в машиностроении и приборостроении при изготовлении приборов и механизмов. Одним из наиболее ответственных этапов изготовления деталей из цветных сплавов является чистовая токарная обработка. Перспективным направлением повышения эффективности чистовой обработки цветных сплавов является применение резцов с алмазно-твердосплавными пластинами (АТП) [1]. Целесообразно применять круглые пластины для повышения срока эксплуатации таких резцов (за счет возможности поворота пластины и использования всего ее периметра).

Условия точения резцами с круглыми АТП отличаются от обработки резцами с острым углом при вершине. Поэтому важно провести экспериментальные исследования с использованием резцов с круглыми АТП и установить влияние скорости резания на основные параметры процесса резания.

При исследовании процесса точения различных материалов важным является знание закономерностей изменения температуры и сил резания на контактных поверхностях инструмента. Кроме того, температура и силы резания влияют друг на друга, а также на скорость, характер изнашивания инструмента и качество обработанной поверхности деталей [2, 3].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование влияния скорости резания на температуру и составляющие силы резания при чистовом точении цветных сплавов резцами, оснащенными круглыми АТП, а также выявление закономерности изменения температурных и силовых характеристик процесса и их влияния на качество обработки. Поставленную задачу представляется возможным решить, применяя комплексный подход к исследованию с применением корреляционного и спектрального анализов полученных экспериментальных данных.

В зависимости от характера изменения площади поперечного сечения среза [4] различают три участка резания: врезание инструмента в заготовку, установившийся процесс резания и выход инструмента из детали. При установившемся резании (самый длительный период обработки) имеет место постоянство среднего значения площади поперечного сечения среза, поэтому этот участок является наиболее важным для исследования силовых и температурных характеристик процесса обработки. Но даже на участке установившегося процесса составляющие  $P_x(\tau)$ ,  $P_y(\tau)$ ,  $P_z(\tau)$  и равнодействующая  $R(\tau)$ , где  $\tau$  – время, являются случайными функциями [5], что было учтено при обработке экспериментальных данных. На участке установившегося резания процесс рассматривался как эргодический, что позволило применить одну реализацию для его корреляционного и спектрального анализа [6].

#### **УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, ОБОРУДОВАНИЕ**

В качестве материала для точения были выбраны алюминиевый сплав АК6 и латунь Л80 вследствие их широкого распространения и использования в машиностроении и приборостроении. Исследование точения двух цветных сплавов позволяет выделить как характерные (общие) для них закономерности изменения температур и сил резания, так и специфические явления, которые обусловлены различной природой физико-химических процессов в зоне резания.

Точение выполняли на высокоточном токарном станке ТПК-125ВМ с бесступенчатым регулированием скорости вращения шпинделя главного привода от 120 до 1800 об/мин и подачей  $S = 0,05$  и  $0,1$  мм/об при глубине резания  $t = 0,1$  мм. В качестве инструмента использовали сборной проходной резец, оснащенный механически закрепленной круглой АТП диаметром 7 мм на подложке из твердого сплава ВК15 с геометрией режущей кромки: передний угол –  $0^\circ$ , задний угол –  $10^\circ$ .

В экспериментах использовали АТП, которые были изготовлены в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины. В структуре алмазосодержащего слоя АТП преобладают крупные частицы алмаза размером 20–60 мкм, между которыми расположены мелкие зерна алмаза и связка из твердого раствора вольфрама в кобальте. Содержание кобальта в алмазосодержащем слое составляет ~ 8,5 % (по массе) [7].

Использовали автоматизированную систему исследования процесса точения [8]. Для измерения температуры резания в державку резца была встроена хромель-алюмелевая термопара, контактирующая с режущей вставкой. Автоматизированная система измерения кроме датчика температуры включала универсальный динамометр УДМ-100 и разработанный авторами тензоусилитель. Для сбора информации использовали АЦП ADA 1406 фирмы “HOLIT Data Systems” и персональный компьютер. Предварительную обработку экспериментальных данных выполняли с помощью про-

граммы Power Graph [9]. Для каждого эксперимента записывали температуру термопары и составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ . Обработка исходных данных включала коррекцию данных (устранение дрейфа нуля), расчет равнодействующей силы резания, а также корреляционный и спектральный анализы.

Для исследования шероховатости обработанной поверхности применяли прибор Surtronic-3 фирмы "Rank Taylor Hobson", Великобритания.

При определении температуры резания использовали градуировку термопары, встроенную в резец, и формулы расчета температуры в зоне резания, описанные в [10].

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ

Как показали исследования, в процессе резания при одном проходе резца термопара вследствие инерционности не фиксирует резкого локального увеличения температуры в зоне резания, поэтому колебания показаний температуры в зоне резания незначительны. Результатом эксперимента после одного прохода резца было определение среднего значения температуры в зоне резания в период установившегося резания.

На рис. 1 приведены зависимости влияние скорости резания  $v$  на температуру в зоне резания  $T$  при точении сплава алюминия и латуни при подачах  $S = 0,05$  и  $0,1$  мм/об.

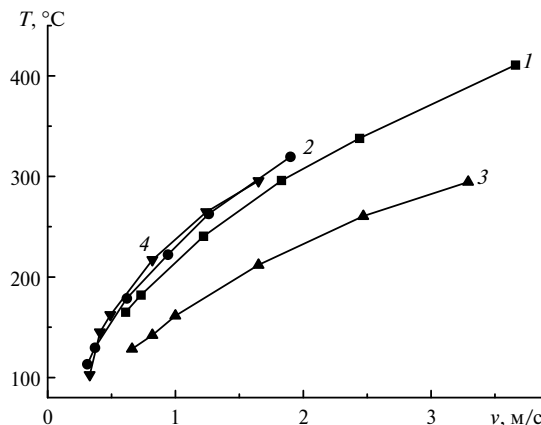


Рис. 1. Изменение температуры в зоне резания  $T$  в зависимости от скорости резания  $v$  при обработке сплава алюминия с подачей  $S = 0,05$  (1),  $0,1$  (2) мм/об и латуни с подачей  $S = 0,05$  (3),  $0,1$  (4) мм/об.

Анализ кривых на рис. 1 обнаруживает следующее:

- при чистовом точении сплава алюминия с увеличением скорости резания  $v$  от  $0,5$  до  $4,0$  м/с ( $S = 0,05$  мм/об) температура в зоне резания нелинейно увеличивается от  $150$  до  $400$  °C;

- при чистовом точении латуни с увеличением скорости резания  $v$  от  $0,7$  до  $3,5$  м/с ( $S = 0,05$  мм/об) температура в зоне резания нелинейно увеличивается от  $110$  до  $270$  °C;

- для сплава алюминия при одинаковых скоростях резания при подаче  $S = 0,1$  мм/об температура в зоне резания на  $4-6$  % выше, чем при  $S = 0,05$  мм/об;

- для латуни при одинаковых скоростях резания при подаче  $S = 0,1$  мм/об температура в зоне резания на  $28-35$  % выше, чем при  $S = 0,05$  мм/об;

– увеличение температуры в зоне резания при увеличении скорости резания  $v$  или подачи  $S$  обусловлено увеличением объема пластической деформации в единицу времени;

– при подаче  $S = 0,05$  мм/об и одинаковых скоростях резания при точении сплава алюминия температура в зоне резания на 25–30 % выше, чем при точении латуни;

– при подаче  $S = 0,1$  мм/об и во всем исследуемом диапазоне скоростей резания при точении сплава алюминия и латуни температуры в зоне резания совпадают.

Объяснить закономерности изменения температуры, приведенные выше, можно только после рассмотрения закономерностей изменения составляющих силы резания.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

На рис. 2 приведены зависимости влияния скорости резания  $v$  на средние значения равнодействующей силы резания  $R$ .

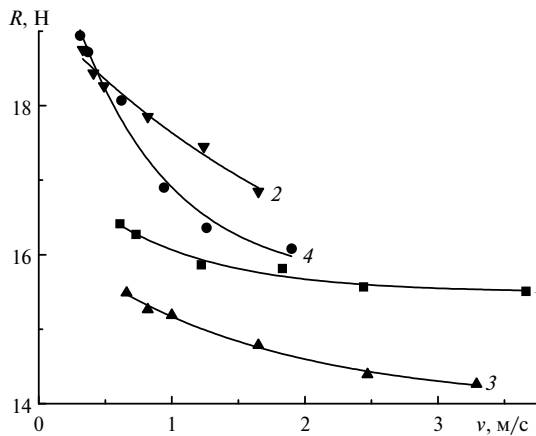


Рис. 2. Изменение средних значений составляющих равнодействующей силы резания  $R$  в зависимости от скорости резания  $v$  при точении сплава алюминия с подачей  $S = 0,05$  (1), 0,1 (2) мм/об и латуни с подачей  $S = 0,05$  (3), 0,1 (4) мм/об.

Анализ представленных на рис. 2 данных позволяет сделать следующие выводы:

– средние значения составляющих и равнодействующей силы резания убывают с ростом скорости резания;

– уменьшение составляющих и равнодействующей силы резания обусловлено снижением предела текучести обрабатываемого материала вследствие увеличения температуры в зоне резания;

– большему значению подачи соответствуют бóльшие значения составляющих и равнодействующей силы резания, так как с ростом подачи увеличивается объем пластически деформированного металла в зоне резания.

При обработке сплава алюминия с подачами  $S = 0,05$  и 0,1 мм/об, а также при обработке латуни с подачей  $S = 0,1$  мм/об составляющие силы резания  $P_y$  и  $P_z$  приблизительно равны. Отличается только обработка латуни с подачей  $S = 0,05$  мм/об – при такой подаче соотношение составляющих  $P_z/P_y \approx 0,60–0,65$ . Это указывает на то, что при обработке латуни с подачей  $S = 0,05$  мм/об

уменьшается усилие, необходимое для возникновения пластической деформации. При этом уменьшается и температура в зоне резания.

На рис. 3 приведены изменения среднеквадратических отклонений (СКО)  $\sigma_R$  равнодействующей силы резания в зависимости от скорости резания  $v$  при точении сплава алюминия и латуни.

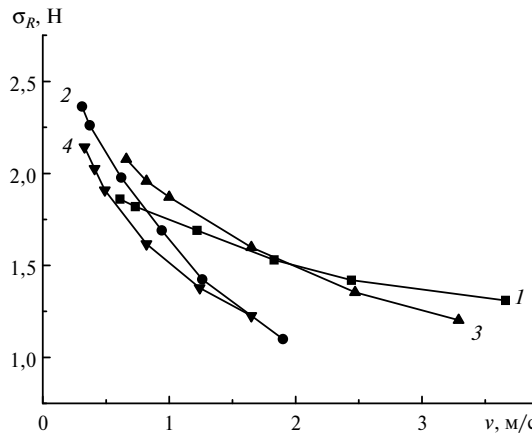


Рис. 3. Изменение  $\sigma_R$  равнодействующей силы резания в зависимости от скорости резания  $v$  при точении сплава алюминия с подачей  $S = 0,05$  (1), 0,1 (2) мм/об и латуни с подачей  $S = 0,05$  (3), 0,1 (4) мм/об.

Из анализа экспериментальных данных следует, что  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_R$  составляющих и равнодействующей силы резания убывают с ростом скорости резания. Наиболее интенсивно убывают СКО равнодействующей силы  $R$  и составляющих  $P_y$  и  $P_z$ , (почти в 2 раза), наименее интенсивно –  $P_x$  (не более 10 %).

Для всех режимов обработки выполнен анализ нормированных корреляционных функций и нормированных спектральных плотностей равнодействующей силы резания. Из анализа нормированных спектральных плотностей равнодействующей силы резания (рис. 4) установлено, что при точении сплавов алюминия и латуни во всем диапазоне изменения скорости резания для равнодействующей силы резания  $R(\tau)$  преобладают гармонические колебания  $R_g(\tau)$  с наложением случайных  $R_s(\tau)$ .

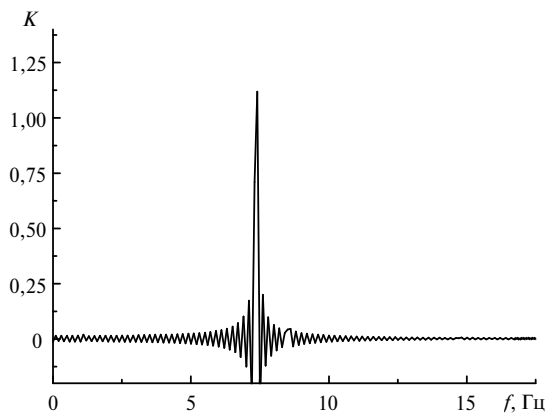


Рис. 4. Нормированная спектральная плотность равнодействующей силы резания  $R$  при точении латуни; режим резания:  $S = 0,05$  мм/об,  $v = 3,3$  м/с.

Сумма гармонических и случайных колебаний  $R_g(\tau) + R_s(\tau)$  представляет переменную часть равнодействующей силы резания  $R(\tau)$ . Постоянная часть  $R_m$  равна среднему значению равнодействующей силы резания. Гармонические колебания (см. рис. 4) можно описать зависимостью

$$R_g(\tau) = A_R \sin(2\pi f_R \tau + \varphi_R),$$

где  $A_R$ ,  $f_R$  и  $\varphi_R$  – амплитуда, частота и фаза гармонических колебаний равнодействующей силы резания соответственно. При исследовании равнодействующей силы резания начальная точка установившегося процесса резания выбирается произвольно. Выбор фазы  $\varphi_R$  зависит от выбора начальной точки и ее значение должно обеспечить наиболее близкие значения амплитуды гармонических колебаний и переменной части равнодействующей силы резания.

Значения параметров  $A_R$ ,  $f_R$  и  $\varphi_R$  определяли путем решения оптимизационной задачи. Критерий оптимизации  $\sigma_s \rightarrow \min$ , где  $\sigma_s$  – СКО случайных возмущений  $R_s(\tau)$ . Путем моделирования было установлено, что частота колебаний  $f_R$  равнодействующей силы резания связана с частотой вращения шпинделя  $f_{ш}$  следующим равенством:  $f_R \approx (0,36-0,38)f_{ш}$ , а амплитуда гармонических колебаний  $A_R \approx (1,41-1,42)\sigma_R$ .

Выполненное математическое моделирование позволило для каждого эксперимента определить гармонические  $R_g(\tau)$  и случайные  $R_s(\tau)$  колебания равнодействующей силы резания  $R(\tau)$  (рис. 5).

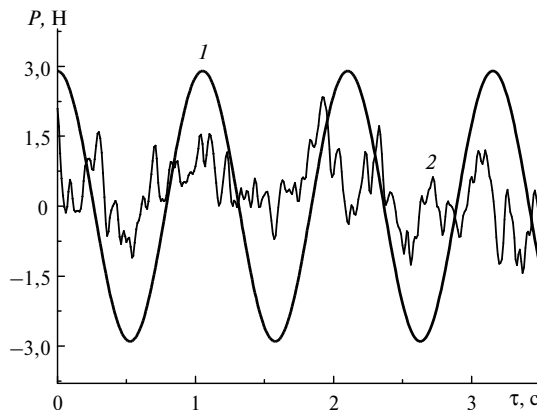


Рис. 5. Гармонические (1) и случайные (2) части равнодействующей силы резания при точении сплава алюминия; режим резания:  $S = 0,1$  мм/об,  $v = 3,3$  м/с.

На рис. 6 представлены нормированные корреляционные функции для гармонических  $P_g(\tau)$  и случайных  $R_s(\tau)$  колебаний равнодействующей силы резания.

Корреляционный и спектральный анализы показывают, что для равнодействующей силы резания  $R(\tau)$  характерны гармонические колебания силы резания  $R_g(\tau)$ , а случайные колебания силы резания  $R_s(\tau)$  можно описать как “белый шум” (см. рис. 6), основной характеристикой которого является  $\sigma_s$ .

Для каждого эксперимента было определено  $\sigma_s$  случайных возмущений  $R_s(\tau)$ . На рис. 7 приведены изменения  $\sigma_s$  случайных колебаний  $R_s(\tau)$  в зависимости от скорости резания  $v$ . Из анализа кривых следует, что при обработке сплава алюминия с увеличением скорости резания среднеквадратические

отклонения  $\sigma_s$  случайных колебаний  $R_s(\tau)$  изменяются незначительно, а при обработке латуни  $\sigma_s$  уменьшаются.

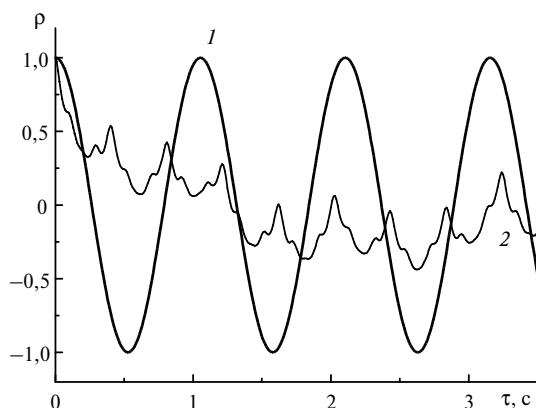


Рис. 6. Нормированные корреляционные функции для гармонических (1) и случайных (2) колебаний равнодействующей силы резания при точении сплава алюминия; режим резания:  $S = 0,1$  мм/об,  $v = 3,3$  м/с.

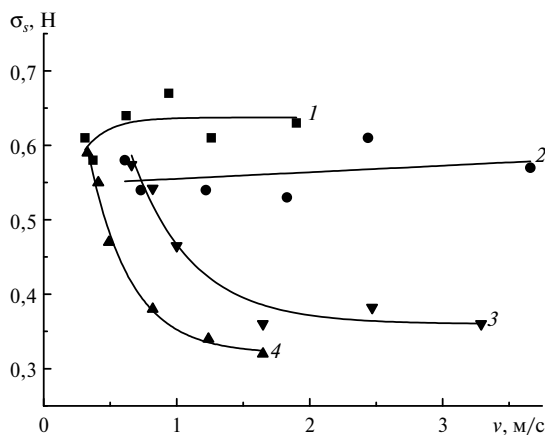


Рис. 7. Изменение  $\sigma_s$  случайных возмущений  $R_s(\tau)$  в зависимости от скорости резания  $v$  при точении сплава алюминия с подачи  $S = 0,05$  (1),  $0,1$  (2) мм/об и латуни с подачи  $S = 0,05$  (3),  $0,1$  (4) мм/об.

Увеличение скорости резания  $v$  обуславливает при обработке сплава алюминия почти постоянное значение параметра шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности, а при обработке латуни  $Ra$  уменьшается (рис. 8).

Кривые на рис. 8 подобны кривым, приведенным на рис. 7, что указывает на корреляционную связь  $\sigma_s$  случайных возмущений  $R_s(\tau)$  и параметра шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности. Следовательно, случайные возмущения сил резания при точении цветных сплавов оказывают доминирующее влияние на формирование неровностей обработанной поверхности.

## ВЫВОДЫ

При чистовом точении алюминиевых сплавов и латуни резцами с круглыми АТП с увеличением скорости резания  $v$  от 0,5 до 4,0 м/с при подаче  $S = 0,1$  мм/об температура в зоне резания увеличивается от 110 до 400 °С нелинейно.

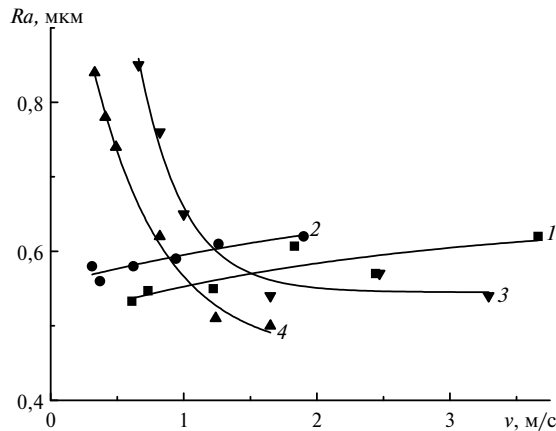


Рис. 8. Изменения параметра шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности от скорости резания  $v$  при точении сплава алюминия с подачей  $S = 0,05$  (1),  $0,1$  (2) мм/об и латуни с подачей  $S = 0,05$  (3),  $0,1$  (4) мм/об.

При чистовом точении латуни резцами с круглыми АТП с увеличением скорости резания  $v$  от  $0,7$  до  $3,5$  м/с и подаче  $S = 0,05$  мм/об температура в зоне резания увеличивается от  $110$  до  $270$  °С нелинейно.

При чистовом точении алюминиевых сплавов и латуни резцами с круглыми пластинками АТП равнодействующая силы резания  $R(\tau)$  изменяется гармонически:  $R(\tau) = A_R \sin(2\pi f_R \tau)$ , с наложением стохастических возмущений  $R_s(\tau)$ . Установлено, что частота колебаний  $f_R$  равнодействующей силы резания связана с частотой вращения шпинделя  $f_{ш}$  зависимостью:  $f_R \approx (0,36 - 0,38)f_{ш}$ , а амплитуда гармонических колебаний  $A_R \approx (1,41 - 1,42)\sigma_R$ .

При чистовом точении алюминиевых сплавов и латуни резцами с круглыми АТП  $\sigma_s$  случайных возмущений равнодействующей силы резания коррелирует со значением параметра шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности.

*Встановлено закономірності змін температури, сили різання і шорсткості обробленої поверхні для різних швидкостей різання при чистовому точінні сплавів алюмінію і латуні різцем з алмазно-твердосплавною пластинкою.*

**Ключові слова:** *точіння, алюмінієві сплави, латунь, алмазно-твердосплавні пластини, температура різання, сила різання, шорсткість.*

*Established were the regularities of variations of the temperature, cutting tool force and roughness of the machined surface for different cutting rates at the precision turning of aluminium and brass alloys using a cutter with the diamond-hard alloy plate*

**Keywords:** *turning, aluminium alloys, brass, diamond-hard alloy plates, cutting temperature, cutting force, roughness.*

1. Инструмент из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. Москва: Машиностроение, 2014. 608 с.
2. Непомнящий В.А., Волков Д.И., Проскуряков С.Л. Стружкообразование при обработке алюминиевых сплавов алмазными инструментами. *Инженерный журнал*. 2003. № 10. С. 21–25.
3. Проскуряков С.Л. Стружкообразование и тепловые процессы при высокоскоростной обработке жаропрочных сплавов. *Инженерный журнал*. 2009. № 4. С. 41–43
4. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. Москва: Машиностроение, 1976. 144 с.



5. Stakhniv N.E., Devin L.N., Petrusha I.A., Osipov A.S. Dynamic phenomena in finish turning of hardened steels with cBN-based tools. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no. 3. P 196–202.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва: Наука. 1969. 576 с.
7. Новиков Н.В., Шульженко А.А. Новые сверхтвердые материалы и их применение в промышленности. *Сверхтв. материалы.* 1987. № 5. С. 8–14.
8. Девин Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. Київ: Наук. думка, 1992. 131 с.
9. Девин Л.Н., Сулима А.Г. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания. *Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПиКАД).* 2008. № 3. С. 24–26.
10. Девин Л.Н., Стахнив Н.Е., Антонюк А.С., Рычев С.В., Нечипоренко В.Н. Влияние скорости резания на температуру и силы при чистовом точении титанового сплава BT1-0 резцом с алмазно-твердосплавной пластиной. *Сверхтв. материалы.* 2019. № 2. С. 65–73.

Поступила в редакцию 25.04.18

После доработки 24.09.18

Принята к публикации 24.09.18