

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (10), 2021

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — для организаций.
Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 03.11.2021. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,50. Уч.-изд. л. 9,30.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014. Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 г. Слоним, Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**,

кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь);

Карташевич А. Н., доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клочков А. В.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клубович В. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь);

Сиваченко Л. А., доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь);

Томило В. А., доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — for companies.
The certificate of the registration of mass media № 1533
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation
Commission of the Republic of Belarus from January 21,
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU
Herald. Engineering Series" is included into the List of
scientific publications of the Republic of Belarus for
publishing the results of theses research on engineering
sciences (mechanical engineering and machines,
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian and English. The journal is distributed
on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 03.11.2021. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 14,50.
Acc.-pub. s. l. 9,30. Circulation of 100 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, Doctor of Technical Sciences, Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A.V.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Educational institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (educational institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Interstate educational institution of higher education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Алифанов А. В., Милюкова А. М., Ционенко Д. А. Модель воздействия импульсного магнитного поля на изделие из титанового сплава

Булойчик И. А. Анализ изменения структурообразования интерметаллидных слоев на основе цинка при цинковании термоупрочненных стальных изделий диффузионным способом из газовой фазы

Дубень И. В., Дремук В. А. Расчет числа витков пружин кручения

Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования износа осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом

Жигар В. И., Довгяло В. А., Моисеенко В. Л. Определение экономической эффективности практического применения методов повышения производительности звеносборочной линии КБ03

Качанов И. В., Филипчик А. В., Шаталов И. М., Булыга Д. М., Ковалевич В. С., Недвецкий С. В., Денисов В. А. Гидроабразивная технология очистки металлических поверхностей гребных винтов от коррозии

Михайлов М. И., Тетерич Н. Э., Воробей В. И. К вопросу о диагностике резцов по силе резания в условиях роботизированного технологического комплекса

Сиваченко Л. А., Абдукаликова Г. М., Сотник Л. Л., Дыдышко И. М. Проблемы, задачи и пути развития пружинных технологических аппаратов

Сотник Л. Л., Русан С. И., Сиваченко Л. А. Анализ пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения вала

Чаевский В. В., Кулешов А. К., Рудак П. В., Барчик С., Коледа П. Влияние ионно-плазменной обработки лезвий ножей на режущую способность фрезы при фрезеровании древесины

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Дубень И. В. Агротехническая и энергетическая оценка работы плужных корпусов с углоснимами

Крупенин П. Ю. Анализ фазового портрета пульсаций доильного аппарата

Филиппов А. И., Лещик С. Д., Калугин Ю. К., Дубень И. В. Исследование и разработка модели по оптимизации процесса разбрасывания удобрений

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tsionenko D. A. Model of impact of pulsed magnetic field on titanium alloy product

12 Bulochyk I. A. Analysis of changes in the structure formation of zinc-based intermetallic layers during galvanizing of heat-hardened steel products by diffusion method from the gas phase

17 Duben I. V., Dremuk V. A. Calculation of the number of torsion springs

24 Jigalov A. N., Goravskii I. A. Experimental study of the wear of an axial milling tool made of high-speed steel R6M5, hardened by aerodynamic sound method

42 Zhihar V. I., Dovgualo V. A., Moiseenko V. L. determination of economic efficiency of practical application of methods for improving the productivity of the link assembly line KB03

51 Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Bulyga D. M., Kovalevich V. S., Nedvetsky S. V., Denisov V. A. Hydro-abrasive technology for cleaning metal surfaces of propellers from corrosion

60 Mikhailov M. I., Teterich N. Э., Vorobei V. I. To the question of cutters diagnostics by cutting force in conditions of a robotic technological complex

67 Sivachenko L. A., Abdikalikova G. M., Sotnik L. L., Dydyshko I. M. Problems, tasks and ways of development of spring technological apparatus

78 Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Analysis of the throughput of a vibrating grinder with variable parameters of the roll movement

88 Chayevski V. V., Kuleshov A. K., Rudak P. V., Barcik Š., Koleda P. The effect of ion-plasma treatment of the blades on the cutting ability of the milling cutter during wood milling

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

95 Duben I. V. Agrotechnical and energy assessment of the work of plough bodies with trashboard

102 Krupenin P. Y. Analysis of the phase portrait of milking machine pulsations

108 Filippov A. I., Leshchik S. D., Kalugin Yu. K., Duben I. V. Research and development of a model for optimizing the fertilizer spreading process

УДК 621.9.01.001.5

М. И. Михайлов, доктор технических наук, профессор;**Н. Э. Тетерич; В. И. Воробей**Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»
пр. Октября, 48, 246746 Гомель, Республика Беларусь, +375 (23) 247 91 61, mihailov@gstu.by

К ВОПРОСУ О ДИАГНОСТИКЕ РЕЗЦОВ ПО СИЛЕ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрена эффективность использования сил резания в качестве параметра диагностики резцов при чистовой обработке для условий роботизированного технологического комплекса. Приведены результаты экспериментальных исследований сил резания и получены коэффициенты эмпирических зависимостей силы резания от подачи и глубины резания. Установлена связь между силами резания и параметрами режимов обработки.

Ключевые слова: резание; точение; диагностика; резцы; силы резания; износ режущих кромок.

Рис. 3. Табл. 2. Библиогр.: 15 назв.

M. I. Mikhailov, Doctor of Technical Sciences, Professor;**N. Э. Teterich; V. I. Vorobei**Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, 48 October Ave.,
246746 Gomel, the Republic of Belarus, +375 (23) 247 91 61, mihailov@gstu.by

TO THE QUESTION OF CUTTERS DIAGNOSTICS BY CUTTING FORCE IN CONDITIONS OF A ROBOTIC TECHNOLOGICAL COMPLEX

The efficiency of using cutting forces as a parameter for diagnostics of cutters during finishing in conditions of RTC is considered. The results of experimental studies of cutting forces are given and the coefficients of empirical dependences of the cutting force on the feed and the depth of cut are obtained. The relationship between the cutting forces and the parameters of the processing modes has been established.

Key words: cutting; turning; diagnostics; cutters; cutting forces; wear of cutting edges.

Fig. 3. Table 2. Ref.: 15 titles.

Введение. Износ режущего инструмента оказывает значительное влияние на эффективность операций механической обработки [1—10]. Время обработки и действующие силы резания влияют на характер процесса износа, который, в свою очередь, связан со стойкостью инструмента [2; 3; 7—15].

В большинстве исследований рассматриваются две основные формы износа — износ по задней поверхности и износ в виде лунки на передней поверхности инструмента [3; 5; 7; 8; 10; 12].

В процессе резания инструмент изнашивается вследствие трения между стружкой и передней поверхностью, а также между заготовкой и задней поверхностью, т. е. в процессе резания происходит удаление микрочастиц с контактных поверхностей, а также микровыкрашивание режущей кромки. Ни один из известных инструментальных материалов не может противостоять трению в условиях высоких температур и давлений без определенных изменений его первоначальной формы с течением времени. Типовая кривая износа по задней поверхности представлена на рисунке 1. Критическое значение износа часто приводится в справочной литературе.

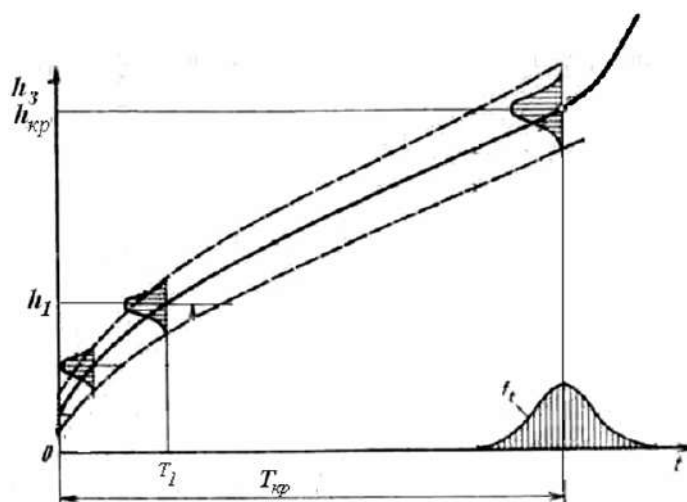


Рисунок 1. — Кривые износа инструмента по задней поверхности

Как видно на рисунке 1, чтобы определить остаточный период стойкости, необходимо знать величину износа по задней поверхности в произвольный период времени T_1 . Величину износа определяют различными методами, как прямыми, так и косвенными измерениями. В качестве косвенных чаще всего используются методы на основе тензоизмерений, при которых тензодатчики размещаются на элементах приводов станков или на элементах оснастки. Использование таких методов требует определения связи между силой резания и размерами площадки износа, которая зависит от режимов обработки и обрабатываемых материалов.

Целью настоящего исследования было установление связи между износом режущей кромки и силами резания, а также возможности использования измеряемых значений силы резания для косвенной оценки износа режущей кромки для условий робототехнических комплексов.

Тщательное изучение износа по задней поверхности показывает, что этот очаг износа состоит из двух самостоятельных участков — износа вершины и износа непосредственно задней поверхности (рисунок 2).

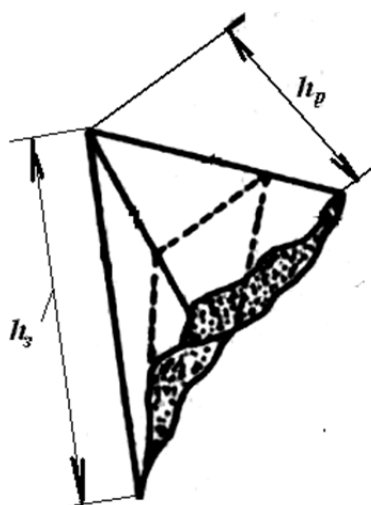


Рисунок 2. — Геометрия износа режущего инструмента

В некоторых случаях износ вершины следует рассматривать отдельно от износа по задней поверхности (см. рисунок 2). Иногда износ по вершине протекает более быстро, чем износ по задней поверхности, особенно при обработке материалов с высокой абразивной способностью и при использовании инструментов с малым радиусом при вершине. При чистовых операциях точения вершина резца находится в непосредственном контакте с заготовкой, и чрезмерный ее износ может оказывать отрицательное влияние на точность обработки и шероховатость поверхности.

Материалы и методы исследования. В случае обработки округление острых углов или затупление вершины приводит к выходу инструментов из строя.

Наращение площадки износа вызывает изменение силы резания:

$$P_z = P_{H_z} + \Delta P_z, \quad (1)$$

где P_z — вертикальная составляющая силы резания, кгс;

P_{H_z} — начальное значение силы, определяемое как

$$P_{H_z} = C_1 t S^u, \quad (2)$$

где C_1 — коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, скорости резания и условий обработки на силу резания;

t — глубина резания;

S — подача;

u — коэффициент, отражающий влияние подачи на силу резания.

При обработке стали твердосплавным резцом приращение силы резания линейно связано с величиной площадки износа:

$$\Delta P_z = C_u t h_3, \quad (3)$$

где ΔP_z — приращение силы резания;

C_u — коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, условий обработки и подачи на силу резания;

h_3 — величина износа по задней поверхности резца.

Подставив (2) и (3) в (1), получим общее выражение для силы резания:

$$P_z = C_1 t S^u + C_u t h_3. \quad (4)$$

Приращение ΔP_z силы резания может быть принято в качестве критерия оценки износа вершины, вызывающего изменение геометрической формы режущей кромки в течение определенного времени работы с определенной подачей.

В любых условиях механической обработки рассматриваются три составляющие силы резания: вертикальная, осевая и радиальная. Измерение этих трех сил проводилось в следующем порядке.

В момент начала резания, т. е. в нулевой момент времени, снимается показание динамометра и рассчитывается значение силы резания P_z , соответствующее работе острого резца, для площади среза A_0 .

Таким же образом снимаются показания для осевой P_x и радиальной P_y составляющих силы резания.

После определенного времени, например 5 мин, измеряется и рассчитывается новое значение силы резания. Это значение соответствует силе P_{H_z} (в кгс) с учетом износа, который резец получит за 5 мин. Действительная площадь среза (в мм^2) меньше расчетной на величину ΔA (в мм^2), т. е. на величину припуска, несрезаемого с поверхности заготовки из-за радиального износа инструмента. Реальная площадь среза $A_p = A_0 - \Delta A$. На рисунке 3 видно, что несрезаемая площадь может быть представлена в виде трапеции, т. е. площадь ΔA равна площади KLMN.

Удельная сила резания K_p (кгс / мм^2), необходимая для удаления слоя ΔA , является постоянной для данного обрабатываемого материала при постоянном значении подачи. Приращение ΔP силы, необходимой для удаления слоя ΔA , может быть определено из выражения

$$\Delta P_z = K_p \Delta A$$

где ΔP_z — величина силы, которую требуется добавлять к вертикальной составляющей силы резания, действующей в течение времени резания (в данном случае $T_m = 5$ мин).

Полное значение вертикальной составляющей силы, действующей на инструмент в течение определенного времени ($T_m = 5$ мин), может быть получено из выражения $P_z = P_{zH} + \Delta P_z$.

Измерения и расчет в такой последовательности выполнялись для разных периодов времени T_m (10, 17, 25, 35, 45, 60 мин).

Результаты исследования и их обсуждение. При математическом расчете сил общее уравнение для главной составляющей силы резания принимается в виде $P_z = P_{zH} + \Delta P_z$.

Рассмотрим члены P_{zH} и ΔP_z этого уравнения (см. рисунок 3).

Начальное значение силы P_{zH} может быть определено из выражения

$$P_{zH} = C_i t^u,$$

где C_i — постоянная, зависящая от свойств инструментального и обрабатываемого материалов, скорости резания и условий обработки;

u — постоянная, зависящая от подачи и вида операции точения.

По мере увеличения времени обработки измеряемое значение P_{zH} уменьшается, однако приращение ΔP_z растет в связи с увеличением износа, поэтому полное значение силы P_z увеличивается. Значения P_{zH} , измеренные в опытах, приведены в таблице 1, по которой рассчитаны значения C_i .

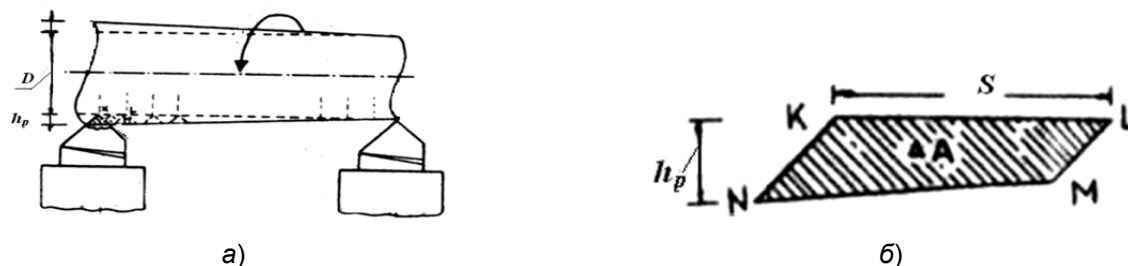


Рисунок 3. — Влияние износа инструмента на образование поверхности заготовки: а — схема обработки; б — сечение несрезаемого слоя

Начальные значения P_H , т. е. при $T_m = 0$, измерялись во всех опытах. Установлено, что все последующие значения P_H были меньше первоначального, что связано с увеличением действительной силы P_z резания. Значение P_{zH} , измеренное при $T_m = 0$, дает величину действительной силы P_z , поскольку приращение ΔP_z равно нулю.

Значение постоянной C_i определялось в каждом опыте, включающем семь проходов, по среднему значению P_{zH} из выражения

$$C_i = P_H / tS^u.$$

В каждом опыте определяли значения P_{zH} (по семи проходам), а также значения tS^u . Значения t и S по всем опытам приведены в таблице 1.

Значение u было постоянным во всех опытах и равным 0,75. Таким образом, для каждого опыта определяли значение C_i . В таблице 1 приводятся значения C_i для 16 опытов, а также расчетное значение.

Значение ΔP_z возрастает с течением времени обработки в связи с постоянным увеличением износа вершины. Можно принять, что величина ΔP_z пропорциональна подаче S и максимальной величине износа h_p вершины, т. е.

$$\Delta P_z = Sh_p, \quad (5)$$

что можно также представить в следующем виде:

$$\Delta P_z = C_S Sh_p, \quad (6)$$

где C_S — постоянный коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, условий обработки и скорости на силу резания.

Т а б л и ц а 1. — Определение среднего значения C_i

Номер опыта	P_{zH} , Н	t , мм	S , мм / об	$C_i = P_H / tS^u$
1	163,5	0,5	0,09	199,0
2	369,5	1,0	0,14	161,4
3	790,0	1,5	0,27	140,6
4	2120,0	2,0	0,62	151,7
5	151,0	0,5	0,09	183,8
6	328,0	1,0	0,14	143,3
7	696,0	1,5	0,27	123,8
8	2080,0	2,0	0,62	148,8
9	124,0	0,5	0,09	150,9
10	313,0	1,0	0,14	136,8
11	712,0	1,5	0,27	126,7
12	1827,0	2,0	0,62	130,7
13	127,0	0,5	0,09	154,5
14	283,0	1,0	0,14	122,8
15	721,0	1,5	0,27	128,3
16	1704,0	2,0	0,62	121,9

Примечание. Среднее значение C_i составило 145,0.

Выражения (5) и (6) экспериментально не подтвердились. На основании опытных данных значения C_S и ΔP_z могут быть получены из выражения

$$C_S = \frac{\Delta P_z}{S^{0,5} h_p} \quad (7)$$

Уравнение (7) получено на основании 112 опытов. В таблице 2 приведены средние значения всех параметров.

Из полученных экспериментальных данных $C_S = 116$.

При известных значениях P_{zH} и ΔP_z можно рассчитать полное значение действующей силы:

$$P_z = P_{zH} + \Delta P_z = C_z t S^u + C_s h_3 S^{0,5}$$

Тогда выражение, связывающее силу резания и износ, будет иметь следующий вид:

$$h_3 = \frac{P_z - 4,64 t \sqrt[4]{S^3}}{116 \sqrt{S}}$$

Данные таблицы 2 позволяют заключить, что, измеряя силу резания, можно определить величину износа и по критическому ее значению рассчитать остаточный период стойкости ΔT :

$$\Delta T = T_1 \left(\frac{h_{кр3}}{h_1} - 1 \right),$$

где T_1 — рассматриваемый промежуток времени;

$h_{кр3}$ — критическое значение величины износа;

h_1 — величина износа инструмента по задней поверхности в рассматриваемый промежуток времени.

Т а б л и ц а 2. — Результаты экспериментов

Время резания, мин	Подача S_0							
	0,09		0,14		0,27		0,62	
	$C_z = 386,6$		$C_z = 310,0$		$C_z = 223,2$		$C_z = 147,3$	
	ΔP_z	h_{3cp}	ΔP_z	h_{3cp}	ΔP_z	h_{3cp}	ΔP_z	h_{3cp}
5	2,19	0,0632	4,89	0,1129	5,68	0,0943	22,18	0,2429
10	4,947	0,1422	5,26	0,1213	7,55	0,1253	37,80	0,4140
17	10,63	0,3062	13,19	0,304	19,41	0,3222	52,73	0,5774
25	10,88	0,3129	18,57	0,4271	12,27	0,2037	52,09	0,5704
35	11,03	0,3171	10,76	0,2480	31,77	0,5273	66,67	0,7301
45	9,673	0,2795	14,73	0,3396	53,69	0,8910	99,08	1,0850
60	15,287	0,4328	19,30	0,4449	53,39	0,8843	112,97	1,2377

Заключение. Экспериментально определены значения постоянных, входящих в зависимости сил резания. Установлены эмпирические зависимости, связывающие силу резания с максимальной величиной износа реза и остаточным периодом стойкости инструмента в условиях робототехнических комплексов.

Список цитируемых источников

1. Лищинский, Л. Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем / Л. Ю. Лищинский. — М. : Машиностроение, 1990. — 312 с.
2. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1990. — 272 с.
3. Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г. Л. Хаега. — М. : Машиностроение, 1989. — 256 с.
4. Нодельман, М. О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента / М. О. Нодельман // Вестн. машиностроения. — 1989. — № 7. — С. 46—48.
5. Маслов, А. Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента / А. Ф. Маслов. — М. : ИТО, 2006. — 169 с.
6. Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В. И. Аверченков [и др.]. — Брянск : БГТУ, 2010. — 148 с.
7. Артамонов, Е. В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов / Е. В. Артамонов. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2003. — 192 с.
8. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. — М. : Машиностроение, 2011. — 368 с.
9. Михайлов, М. И. Повышение надежности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов. — Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. — 272 с.
10. Васин, С. А. Проектирование сменных многогранных пластин. Методологические принципы / С. А. Васин, С. Я. Хлудов. — М. : Машиностроение, 2006. — 352 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. М. Дальского [и др.]. — М. : Машиностроение, 2001. — Т. 2. — 944 с.
12. Грановский, Г. И. Резание металлов : учеб. для машиностр. и приборостр. специальностей вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М. : Высш. шк., 1985. — 304 с.
13. Справочник конструктора-инструментальщика / В. И. Баранчиков [и др.] ; под общ. ред. В. А. Грецишниковой и С. В. Кирсанова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2006. — 542 с.
14. Гузеев, В. И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезернорасточных станков с числовым программным управлением : справочник / В. И. Гузеев, В. А. Батуев, И. В. Сурков. — М. : Машиностроение, 2007. — 368 с.
15. Васин, С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С. А. Васин. — М. : Машиностроение, 2006. — 384 с.

Поступила в редакцию 14.10.2021.