

Оценка эффективности прерывистого резания на основе использования закономерностей изменения теплонапряженности процесса

10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0623113

Ярославцев В. М., Назаров Н. Г.

УДК 621.9.014: 621.91.01

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

mt13@bmstu.ru

Одним из способов совершенствования процесса резания является резание с вибрациями [1, 2], при котором режущему инструменту или (и) заготовке дополнительным внешним источником энергии целенаправленно задают вынужденные колебания. При оптимальных условиях обработки данным способом решаются такие технологические задачи, как увеличение производительности труда и периода стойкости инструмента, повышение точности и качества обработанной поверхности, дробление сливной стружки и другие. В этом случае большую роль в обеспечении эффективности процесса резания играет режим вынужденных колебаний, который в свою очередь зависит от решаемых задач и определяется рациональным выбором направления и параметров вибраций (амплитуды A , частоты f и фазы φ_k колебаний).

Экспериментальные исследования вибрационного резания, выполненные в МГТУ им. Н.Э. Баумана, показали, что повышение периода стойкости инструмента и соответствующее увеличение производительности труда достигаются в первую очередь за счет снижения теплонапряженности процесса резания. Установлено, что наиболее существенное повышение периода стойкости инструмента имеет место на режимах колебаний, обеспечивающих периодический выход инструмента, его режущих лезвий из зоны резания. За время холостого пробега инструмента происходит охлаждение его рабочей части (выравнивание температуры), отдых контактных поверхностей (перераспределение точечных дефектов и дислокаций, а также частичная релаксация напряжений), обеспечивается беспрепятственный доступ смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) к режущим кромкам лезвия.

Для аналитического определения ожидаемого повышения периода стойкости инструмента при прерывистом резании была предложена расчетная модель [3], учитывающая характер изменения силы и температуры резания при обработке с относительно малыми длинами среза за один цикл (рис. 1). Из рис. 1 видно, что при врезании инструмента сила резания P практически мгновенно принимает установившееся значение, равное силе $P_{ст}$ при стационарном процессе, что в целом соответствует опытным

данным экспериментальных исследований процесса стружкообразования. Температура θ поверхности трения представляет собой параметр более инерционный во времени t . Согласно экспериментальным данным при врезании инструмента рост температуры контактных поверхностей на участке t_0 (период теплонасыщения) имеет характер зависимости степенного типа (см. рис. 1) с показателем степени $\sim \sqrt{t}$ [4]. Величина температуры в каждый момент времени зависит от теплофизических свойств материалов инструмента и заготовки, элементов режима резания (скорости резания v , подачи S и глубины резания t_p), геометрии инструмента и заготовки, применяемой СОЖ и др. В период t_{0k} холостого пробега инструмента идет процесс выравнивания температур, охлаждения его контактных поверхностей. Процесс свободного охлаждения описывается экспоненциальным законом [5] – см. рис. 1. Если предположить, что за время t_{0k} холостого пробега инструмента температура резания в результате его охлаждения становится близкой к первоначальной (в точке $t=0$ на рис. 1), то температурная зависимость $\theta(t)$ на втором и всех последующих циклах с временными параметрами t_0 и t_{0k} практически не будет отличаться от рассмотренной. В целом процесс прерывистого резания, который характеризуется однородным во времени изменением в каждом цикле основных физических параметров обработки ($P(t)$, $\theta(t)$ и др.), можно рассматривать как стационарный циклический процесс. Для исследования такого процесса может быть выбран любой отдельный цикл «резание – холостой пробег инструмента».

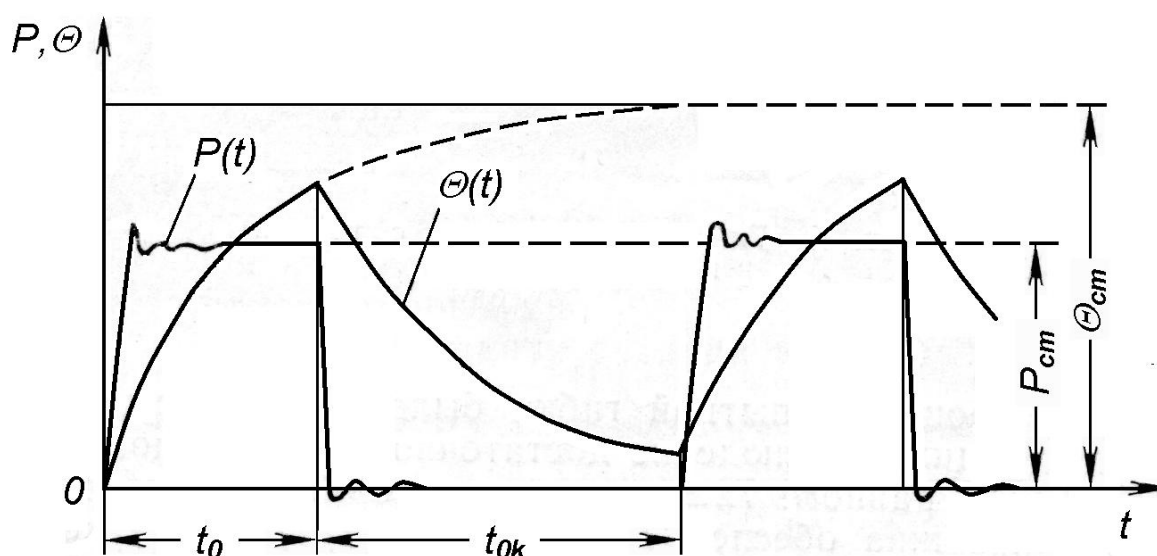


Рис. 1. Изменение силы P и температуры θ при стационарном прерывистом резании с малыми длинами среза за цикл

Как видно из рис. 1, при малой длине участка резания (времени работы инструмента t_0 за один цикл) температура не успевает достигнуть установившегося значения $\theta_{ст}$, и ее среднее значение при прерывистом резании может быть значительно ниже температуры процесса при непрерывной работе инструмента и прочих равных условиях обработки.

Взаимосвязь температуры резания с периодом стойкости инструмента выражается зависимостью вида:

$$T = \frac{C_{\theta}}{\theta^y}.$$

Здесь C_{θ} – постоянная, характеризующая условия обработки; y – показатель степени, учитывающий влияние температуры резания на период стойкости инструмента. Численное значение величины показателя степени y в зависимости от физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого материала может достигать 8 - 16, что объясняет большое влияние температуры в зоне резания на стойкость и другие технико-экономические показатели процесса обработки.

В соответствии с этим, повышение периода стойкости инструмента T_{np} при прерывистом резании (без учета времени холостых пробегов Σt_{0K} – см. рис. 1) по сравнению с периодом стойкости режущего инструмента T при непрерывном резании может быть представлено как

$$K_T = \frac{T_{np}}{T} = \frac{\theta_{cm}^y}{\int_0^{t_0} \theta_p^y(t) dt},$$

где K_T – коэффициент, характеризующий эффективность прерывистого резания по сравнению с непрерывным по стойкости инструмента при прочих равных условиях обработки; $\theta_p(t)$ – изменение температуры во времени на участке резания t_0 при прерывистой обработке.

Большое влияние температуры резания на износ инструмента создает предпосылки для обеспечения высокой эффективности применения прерывистого резания как средства повышения периода стойкости инструмента и производительности обработки, в частности, при осуществлении различных способов вибрационного резания.

Вместе с тем, холостой пробег инструмента при прерывистом резании снижает производительность процесса. Для компенсации времени холостых пробегов t_{0K} и повышения производительности необходимо повысить значения параметров режима обработки: скорости резания v , подачи S или (и) глубины резания t_p . Например, для обеспечения одинаковой производительности процессов (по основному технологическому времени) прерывистого и обычного резания за счет скорости резания v_{np} или подачи S_{np} требуется выполнить условия

$$v_{np} = \frac{v(t_0 + t_{0K})}{t_0}; \quad S_{np} = \frac{S(t_0 + t_{0K})}{t_0}.$$

Повышение числовых значений элементов режима резания вызывает соответствующее увеличение температуры резания и снижение периода стойкости T_{np} инструмента.

Одним из показателей эффективности прерывистого резания может служить отношение δ длины пути резания при прерывистой обработке к длине пути резания при обычной кинематике процесса обработки для соответствующих значениях периодов стойкости T и $T_{пр}$ инструмента; в соответствии с этим

$$\delta = \frac{v_{np} T_{np}}{vT}.$$

Аналитические исследования [3] показали, что сокращением времени работы режущего инструмента t_0 за один цикл (длины участка непрерывного резания l_p) можно обеспечивать в широких пределах повышение периода стойкости инструмента (K_T) при равной производительности процесса обработки, когда $v_{np}t_0 = v(t_0 + t_{0K})$. Это означает, что несмотря на необходимое для компенсации холостых пробегов инструмента увеличение скорости резания v_{np} , теоретически во всех случаях (при показателе степени $y > 0$) соответствующим выбором кинематики обеспечивается снижение теплонапряженности процесса обработки. Аналогично достигается повышение производительности для заданного значения периода стойкости (одинаковой теплонапряженности).

Таким образом, для увеличения при прерывистом резании периода стойкости инструмента и производительности обработки необходимо сокращать длину участка резания l_p за цикл. При вибрационном резании это приводит к высокой частоте повторения циклов резания и холостых пробегов инструмента. В этом случае изменяется сам характер взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой [7] и фактор теплонапряженности может стать второстепенным, т. е. обеспечить желаемую эффективность обработки не всегда представляется возможным. Минимальные значения длин участков резания или граница применимости рассматриваемых теоретических соотношений зависят от вида технологической операции, конструкции инструмента, жесткости технологической системы, обрабатываемого материала и других факторов. В частности, при резании с вибрациями отрицательное воздействие на стойкость инструмента оказывает переменная нагрузка на режущую кромку, периодически действующая в моменты входа лезвия инструмента в обрабатываемый материал и выхода из него, цикличное изменение кинематических углов инструмента. Кроме того, оценивая эффективность вибрационного резания, необходимо учитывать возможность снижения качества обработки, а также долговечности отдельных узлов станка и технологической оснастки.

На практике достаточно высокий эффект повышения стойкости инструмента без снижения производительности обработки при прерывистом резании зачастую достигается в интервале длин участков $l_p = 0,5 \div 2,5$ мм за цикл.

Если время t_{0K} холостого пробега инструмента относительно мало (рис. 2) и не обеспечивает необходимого выравнивания температуры за один цикл резания ($t_0 + t_{0K}$), то процесс периодического изменения температуры $\theta(t)$ после врезания инструмента при $t=0$ имеет определенную тенденцию развития во времени. Такой процесс с изменяющимися во времени характеристиками внутри отдельных циклов резания, является нестационарным. Вместе с тем, как видно из рис. 2, через определенное число циклов «резание – холостой пробег инструмента» процесс стабилизируется и может рассматриваться как стационарный.

Чем больше длительность t_0 участка резания и меньше время $t_{0к}$ выравнивания температуры, тем быстрее достигается установившееся состояние циклического изменения температуры резания.

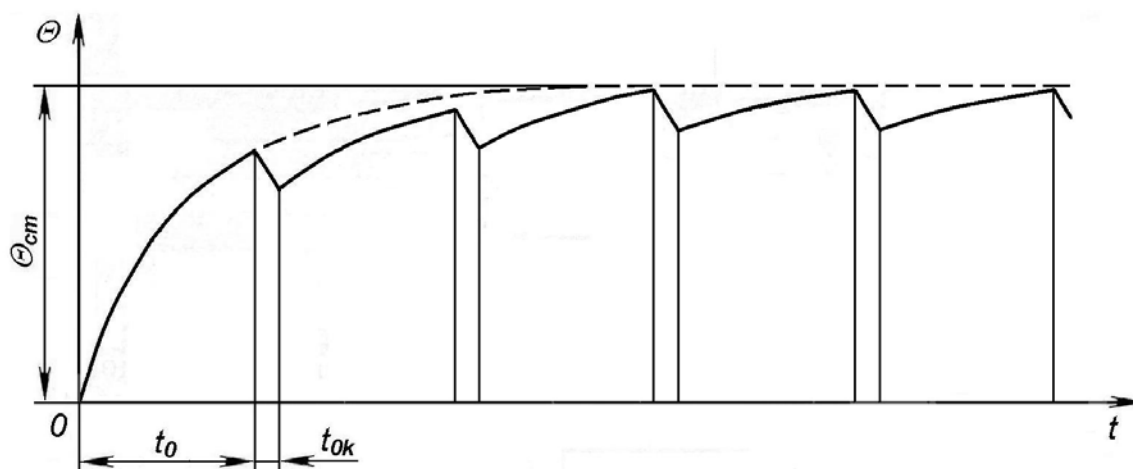


Рис. 2. Характер изменения температуры резания θ при относительно малых отрезках времени $t_{0к}$ холостого пробега инструмента за цикл (нестационарное резание)

По мере увеличения длины участка резания или сокращения длительности отдыха инструмента технологический эффект, связанный с изменением теплонапряженности при периодическом прерывании процесса резания, уменьшается (см. рис. 2). Тем не менее, как показывают исследования [1, 3, 6, 8], в ряде случаев вибрационного резания такие условия обработки при реализации метода являются технически наиболее приемлемыми и обоснованными, вызывая необходимость технологической отработки процесса на базе модели рис. 2.

Область применения рассмотренных физических моделей не ограничивается приведенными примерами. Они могут быть использованы для широкого круга технологических задач, решение которых связано с оценкой степени влияния теплофизических процессов и явлений при резании на условия обеспечения эффективности обработки и требований к качеству продукции. Это прежде всего разработка и совершенствование технологических операций, кинематика которых предусматривает циклически повторяющееся прерывание процесса обработки, например, ударно-прерывистое резание, обтачивание оребренных поверхностей, нарезание резьб метчиками с крутильными колебаниями, фрезерование, профильное шлифование кругом с прерывистой рабочей поверхностью, обработка алмазными сегментными кругами, прерывистое шлифование абразивной лентой, шлифование лепестковыми кругами, обработка эластичными кругами, способы упрочнения поверхностей центробежным и ультразвуковым упрочнителями, чеканкой и др.

При исследовании процессов, в которых технологические воздействия на материал заготовки носят случайный характер (упрочнение поверхности путем вибронаклепа, обработка потоком свободных абразивных частиц [9] и др.), числовые характеристики схематизированных моделей условий теплообмена на рис. 1 и 2 будут также представляться случайными величинами.

Особую разновидность представляют технологические задачи, когда перерывы в работе инструмента отсутствуют, но циклично изменяются условия его работы, напряженность процесса резания. Например, обработка заготовок на автоматизированном металлообрабатывающем оборудовании может сопровождаться периодическим изменением скорости резания v , подачи S , глубины резания t_p в отдельности или разных сочетаний этих параметров одновременно. Тогда оценку влияния переменного теплообмена на технологические показатели процесса обработки следует производить на основе модели рис. 2 с учетом соответствующих значений начальных и граничных условий. Если длины l_{pi} участков резания с постоянными режимными параметрами v_i , S_i и t_{pi} относительно велики ($l_{pi} > 15...20$ мм), то как показывают экспериментальные исследования [10, 11], переходными тепловыми процессами можно без большой погрешности пренебречь. В этом случае расчетное определение технологических показателей обработки осуществляется в предположении скачкообразного изменения физических параметров процесса резания.

Список литературы

1. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. 350 с.
2. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ярославцев В.М. Нетрадиционные методы обработки материалов: печатная версия мультимедийного учебника. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 212 с.
3. Подураев В.Н., Ярославцев В.М. Определение стойкости инструмента при прерывистом резании // Вестник машиностроения. 1970. № 2. С. 70-73.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / пер. с англ. А.А. Померанцева. М.: Наука, 1964. 488 с.
5. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.
6. Подураев В.Н., Суворов А.А., Ярославцев В.М. Нарезание резьб в нержавеющей и жаропрочных сталях вибрационным и ударно-импульсным методами // Вестник машиностроения. 1965. № 10. С. 63-66.
7. Sandvik Ceramic Cutting Tool Tests with an Interrupted Cut Simulator / Robert Cep, Adam Janasek, Lenka Cepova, Josef Prochazka // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2010. Vol. 48. P. 736-740.
8. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
9. Назаров Н.Г. Моделирование процесса взаимодействия абразивного зерна с поверхностью пластины // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 12. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/278409.html> (дата обращения 01.09.2013).
10. Подураев В.Н., Ярославцев В.М. Стойкость инструмента при прерывистом резании // Станки и инструмент. 1969. № 10. С. 25-28.
11. Ярославцев В.М. Определение стойкости инструмента при точении с опережающим пластическим деформированием // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1979. № 5. С. 134-140.

Estimating efficiency of interrupted cutting on the basis of change pattern in heat density of the process

10, October 2013

DOI: 10.7463/1013.0623113

Yaroslavtsev V.M., Nazarov N.G.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

mt13@bmstu.ru

Calculation models of changes in heat density of an interrupted cutting process and their connection with technical and economical processing indexes were considered in this paper; these indexes allow one to determine changes in cutting tool life and in working efficiency, depending on kinematical features of the process. Manufacturing operation and kinds of work such as edge cutting, abrasive and surface plastic deformation with cyclic change of mode parameters were presented. During investigation of these operations or their development at the stage of process design it is rational to apply the specified models.

Publications with keywords: [the period of tool life](#), [interrupted cutting](#), [cutting temperature](#), [calculated model](#), [stationary process](#), [non-stationary process](#), [efficiency of process](#)
Publications with words: [the period of tool life](#), [interrupted cutting](#), [cutting temperature](#), [calculated model](#), [stationary process](#), [non-stationary process](#), [efficiency of process](#)

References

1. Poduraev V.N. *Obrabotka rezaniem s vibratsiyami* [Cutting with vibrations]. Moscow, Mashinostroenie, 1970. 350 p.
2. Kovshov A.N., Nazarov Yu.F., Yaroslavtsev V.M. *Netraditsionnye metody obrabotki materialov: Pechatnaya versiya mul'timediynogo uchebnika* [Non Conventional Methods of Materials Machining: printed version of multimedia tutorial]. Moscow, MGOU Publ., 2007. 212 p.
3. Poduraev V.N., Yaroslavtsev V.M. *Opreделение stoykosti instrumenta pri preryvistom rezanii* [Determination of cutting tool durability at interrupted cutting]. *Vestnik mashinostroeniya*, 1970, no. 2, pp. 70-73.
4. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford University Press, 1959. (Russ. ed.: Karslou G., Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel*. Moscow, Nauka, 1964. 488 p.).
5. Rykalin N.N. *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* [Calculations of thermal processes in welding]. Moscow, Mashgiz, 1951. 296 p.

6. Poduraev V.N., Suvorov A.A., Yaroslavtsev V.M. Narezanie rez'b v nerzhaveiushchikh i zharoprochnykh staliakh vibratsionnym i udarno-impul'snym metodami [Threading in stainless and heat resisting steels using vibration and shock pulse methods]. *Vestnik mashinostroeniia*, 1965, no. 10, pp. 63-66.
7. Cep R., Janasek A., Cepova L., Prochazka J. Sandvik Ceramic Cutting Tool Tests with an Interrupted Cut Simulator. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, vol. 48, pp. 736-740.
8. Yakimov A.V. *Abrazivno-almaznaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey* [Abrasive-diamond machining of shaped surfaces]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 312 p.
9. Nazarov N.G. Modelirovanie protsessa vzaimodeystviya abrazivnogo zerna s poverkhnost'yu plastiny [Modeling of processes of interaction of abrasive grains with the surface of plate]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 12. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/278409.htm> , accessed 01.09.2013.
10. Poduraev V.N., Yaroslavtsev V.M. Stoykost' instrumenta pri preryvistom rezanii [Tool durability in interrupted cuts]. *Stanki i instrument*, 1969, no. 10, pp. 25-28.
11. Yaroslavtsev V.M. Opredelenie stoykosti instrumenta pri tochenii s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem [Determination of tool durability when turning with advanced plastic deformation]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 1979, no. 5, pp. 134-140.