

СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РЕЗАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

The cutting tool power at unsteady parameters of cutting at numerically-controlled lathes



И. А. Кашталян
I. A. Kashtalyan

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Приведены результаты экспериментальных исследований стойкости режущего инструмента при формообразовании деталей на токарных станках с ЧПУ с преднамеренным введением в процесс резания кинематической неустойчивости путем изменения подачи в функции пути. Приведены математические модели, устанавливающие взаимосвязь размерной стойкости инструмента с параметрами переменной подачи.

The results of the experimental research of the cutting tool power during parts shaping at numerically-controlled lathes in the case of kinematical instability intentional insertion in the cutting process by feed changing in the function of path are cited. The mathematical models defining dimensional tool power and variable feed parameters correlations are presented.

Одной из важнейших задач современного машиностроения является автоматизация многономенклатурного серийного производства. Решается эта задача главным образом путем внедрения станков и станочных комплексов с числовым программным управлением (ЧПУ). Относительная доля оборудования с ЧПУ в станочном парке предприятий машиностроения постоянно возрастает, и в этой связи все более актуальными становятся вопросы их эффективной эксплуатации. Одним из путей решения этой задачи является преднамеренное введение в процесс резания кинематической неустойчивости [1]. Чаще это изменение подачи или скорости резания в функции пути (линейное и модулированное изменение подачи, прерывание подачи, поддержание постоянства скорости резания и подачи на оборот в условиях бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя и др.). Например, на токарных станках с ЧПУ указанные изменения подачи и скорости резания, как правило, реализуют с целью повышения производительности, точности и виброустойчивости обработки нежестких заготовок, кинематического дробления стружки.

При точении с переменной подачей в широких пределах изменяются геометрические параметры сечения срезаемого слоя, кинематические углы режущего лезвия инструмента. Это определяет условия протекания пластического деформирования в зоне резания, приводит к изменению скоростей сдвига и размеров зоны пластической деформации. Как следствие изменяется площадь контакта режущей части резца с металлом и условия трения по передней и задней поверхностям, что отражается на силовом и температурном режимах обработки [2]. От указанных факторов в значительной степени зависит стойкость режущего инструмента, которая в свою очередь оказывает влияние на точность обработки и качество поверхности. В этой связи возникает необходимость в исследованиях влияния параметров переменной подачи на стойкость режущего инструмента. Полученные результаты могут быть использованы при определении диапазонов регулирования подачи с целью повышения эффективности процесса формообразования на станках с ЧПУ, а также при создании адаптивных систем, у которых в качестве управляющего воздействия используется подача.

Наиболее ярко явления изменения силового и температурного режимов, а, следовательно, и интенсивности изнашивания режущего инструмента проявляются при сравнительно больших диапазонах и скоростях изменения подачи (более 100 мм/мин/с). Таким условиям соответствует модулированное изменение подачи и ее прерывание. Эти изменения подачи и были приняты за основу при исследовании стойкости режущего инструмента.

По алгоритму модулированного изменения подачи управляющее устройство ступенчато (приращениями ΔS по мере отработки участков Δl между приращениями подачи) увеличивает минутную подачу от S_{\min} до S_{\max} , а затем также ступенчато снижает ее [3]. Длина участка l_1 разгона (замедления) при этом равна: $l_1 = n_s \Delta l$, где n_s — число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{\min} до S_{\max} .

По алгоритму прерывания подачи управляющее устройство периодически через определенное число импульсов n_B , поступающих на привод подачи, выдает импульсы n_A , которые на привод подач не поступают (отрабатываются фиктивно). В результате периодически после перемещения исполнительного органа станка на расстояние длиной $L_B = n_B Z_0$, устройством ЧПУ отрабатывается фиктивное перемещение $L_A = n_A Z_0$, где Z_0 — величина перемещения исполнительного органа станка при отработке одного импульса, выдаваемого устройством ЧПУ на привод подач. Время на пе-

ремещение L_B и время на фиктивное перемещение L_A (выдержка времени) определяются скоростью минутной подачи, задаваемой в кадре управляющей программы.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием токарного станка с ЧПУ мод. 1А751Ф3. Обрабатывались заготовки из стали 45 при различных скоростях резания проходными резцами с пластинами из твердого сплава Т15К6. Причем были использованы резцы с напаянной пластиной и резцы с механическим креплением пластины. Резцы с напаянной пластиной (геометрические параметры режущей части: $\phi = 90^\circ$; $\phi_1 = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 0,5$ мм) применялись для исследования износа по передней и задней поверхностям. Резцы с механическим креплением режущей пластины (геометрические параметры режущей части: $\phi = 95^\circ$; $\phi_1 = 5^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 12^\circ$; $\lambda = 8^\circ$; $r = 0,8$ мм) были использованы при исследовании размерного износа. Резцы доводились алмазным крутом. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялась эмульсия, изготовленная из эмульсола НГЛ-205.

Износ резцов оценивался по ширине площадки износа по задней поверхности h_3 и размеру лунки (глубине h_A и ширине b_A) на передней. Ширина площадки износа измерялась с помощью универсального измерительного микроскопа модели УИМ-23. Для измерения глубины лунки был использован индикатор часового типа модели 1-МИГ. С помощью профилографа-профилометра модели 201 производилась также запись профиля лунки в направлении вспомогательной режущей кромки резца. Фиксация размерного износа осуществлялась путем измерения расстояния между специальным эталонным упором на державке и вершиной режущей кромки резца. От внешнего воздействия в процессе резания упор предохранялся съемным колпачком. В качестве измерительного инструмента был использован окуляр-микrometer электронный МОЭ —4...15 НПО «Планар» (Беларусь) с ценой деления 0,1 мкм. Температура резца при измерениях износа фиксировалась хромель-копелевыми термомпарами, которые вставлялись в отверстия, выполненные в боковой стенке державки.

Зависимости ширины площадки износа по задней поверхности h_3 и размеров лунки (глубины h_A и ширины b_A) на передней от пути резания L_p при скорости резания $v = 120$ м/мин и глубине резания $t = 2$ мм для различных изменений подачи в функции пути представлены на рис. 1. Графики строились по средним значениям тридцати замеров. Интервальная оценка среднего значения, а также сравнение дисперсий и средних произ-

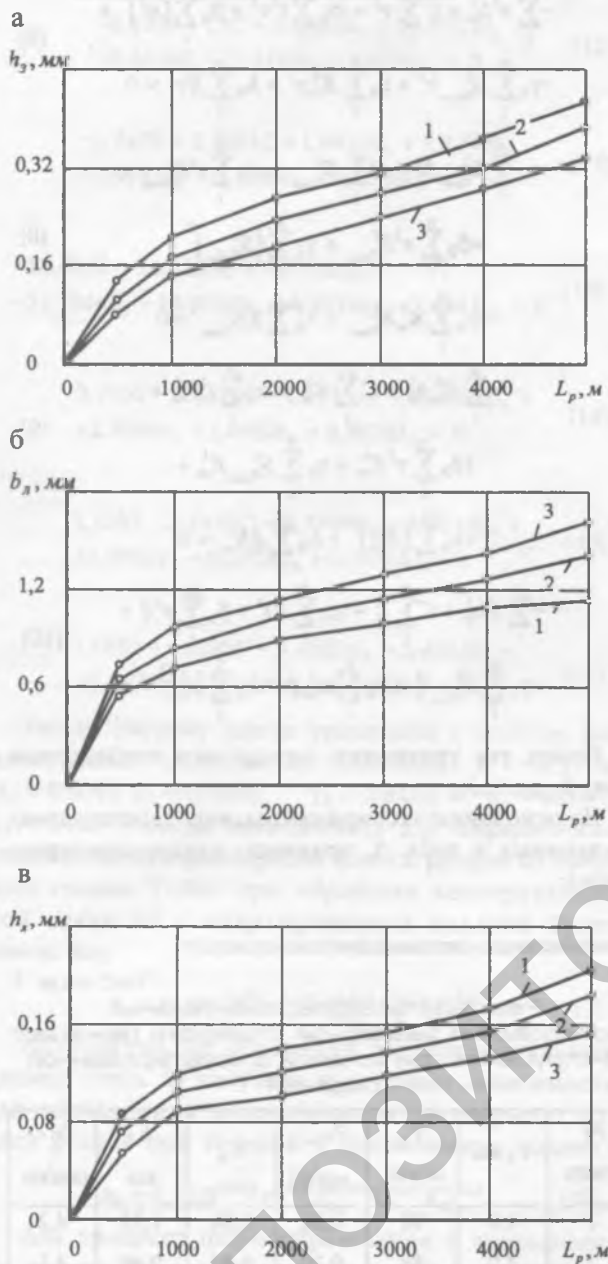


Рис. 1. Зависимости ширины площадки износа на задней поверхности h_3 (а), ширины лунки b_A (б) и глубины лунки h_A (в) на передней поверхности резца от пути резания L_p при точении: 1 — с постоянной подачей ($S_o = 0,3$ мм/об); 2 — с прерыванием подачи ($S_o = 0,3$ мм/об; $K_A = 1$; $K_B = 2$); 3 — с модулированной подачей ($S_{o_{max}} = 0,4$ мм/об; $K_M = 0,5$; $l_1 = 0,8$ мм).

водились согласно работе [4]. Для определения пути резания L_p при точении с постоянной подачей, модулированной подачей и ее прерыванием были использованы соответственно следующие зависимости:

$$L_p = \pi d l / 1000 S_o; \quad L_p = \pi d l / 500 (S_{o_{min}} + S_{o_{max}});$$

$$L_p = \pi d l (K_A + K_B) / 1000 S_o K_B$$

где d и l — соответственно диаметр и длина обрабатываемой поверхности в мм.

Из графиков видно, что при точении с переменной подачей наблюдается некоторое уменьшение износа по передней поверхности. Это проявляется в уменьшении глубины лунки при увеличении ее ширины. Максимальная глубина лунки находится у самой режущей кромки. По мере удаления от режущей кромки глубина лунки уменьшается. Такое изменение глубины лунки можно объяснить некоторым уменьшением составляющих силы резания и температуры. Увеличение же ее ширины обусловлено периодическим увеличением — уменьшением радиуса сходящей стружки, в результате чего центр максимальных давлений и температуры постоянно перемещается по передней поверхности резца.

Размерную стойкость инструмента можно характеризовать продолжительностью его работы без подналадки или замены, количеством обработанных заготовок, площадью обработанной поверхности, объемом снятого материала и длиной пути резания. Однако эти характеристики непригодны для выбора оптимальных условий формообразования, поскольку не учитывают уровни скорости резания и допустимого затупления. Более объективными при этом являются показатели относительного размерного износа. В качестве такого показателя был использован линейный износ, отнесенный к 1000 метров пути резания h_0 . Величина h_0 подсчитывается по следующей зависимости: $h_0 = 1000 h_p / L_p$, где h_p — размерный износ в микрометрах; L_p — общая длина пути резания в метрах.

Предварительные исследования, выполненные по методике [5], разработанной в МВТУ им. Баумана Медведевым Д. Д., показали, что взаимосвязь различных параметров, влияющих на относительный размерный износ режущего инструмента при нестационарном резании достаточно точно выражается эмпирическими зависимостями, которые описываются степенными функциями следующего вида: точение с модулированной подачей

$$h_0 = C_h t^{\alpha_h} v^{\beta_h} S_{o_{max}}^{\gamma_h} K_m^{\epsilon_h} l_1^{\eta_h}; \quad (1)$$

точение с прерыванием подачи

$$h_0 = C_h t^{\alpha_h} v^{\beta_h} S_{o_{max}}^{\gamma_h} K_A^{\mu_h} K_B^{\psi_h}; \quad (2)$$

где C_h — коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и материала режущего инструмента; t — глубина резания, мм; v — скорость резания, м/мин; $S_{o_{max}}$ — верхнее пиковое значение

модулированной подачи, мм/об; K_m — отношение нижнего пикового значения модулированной подачи $S_{o_{max}}$ к ее верхнему пиковому значению $S_{o_{max}}$; l_1 — длина пути разгона (замедления) при модулированном изменении подачи, мм; S_{o_n} — скорость подачи при работе с ее прерыванием, мм/об; K_A — отношение фиктивного перемещения L_A в направлении подачи к подаче на оборот S_{o_n} ; K_B — отношение перемещения в направлении подачи между ее прерываниями L_B к подаче на оборот S_{o_n} ; $\alpha_h, \beta_h, \gamma_h, \varepsilon_h, \lambda_h, \mu_h, \psi_h$ — показатели степени, различные для различных обрабатываемых материалов и условий обработки.

Для процесса формообразования с модулированной подачей параметры режима резания изменялись в следующих диапазонах: $t = 1,0 \dots 4,0$ мм; $v = 80 \dots 160$ м/мин; $S_{o_{max}} = 0,2 \dots 0,6$ мм/об; $K_m = 0,5 \dots 0,8$; $l_1 = 0,4 \dots 1,25$ мм. Нижний и верхний уровни K_m назначены из условия рационального использования метода обработки с модулированной подачей. С уменьшением K_m происходит уменьшение среднего значения подачи, что приводит к увеличению машинного времени. Слишком большие значения K_m приводят к снижению эффекта от использования модулированной подачи. Длина пути разгона (замедления) l_1 определяет частоту модуляции подачи. По данным В. Н. Подураева [1] хороший эффект от метода обработки с модулированной подачей может быть получен при частоте модуляции около 2,75 Гц. Величина параметра l_1 для указанной частоты модуляции находится в пределах от 0,4 до 1,25 мм.

Для установления зависимостей (1) и (2) использован метод наименьших квадратов. Например, логарифмируя уравнение (1), получим

$$\lg h_0 = \lg C_h + \alpha_h \lg t + \beta_h \lg v + \gamma_h \lg S_{o_{max}} + \varepsilon_h \lg K_m + \lambda_h \lg l_1 \quad (3)$$

Пологая $\lg h_0 = H_0^1$; $\lg C_h = C$; $\lg t = t^1$; $\lg v = v^1$; $\lg S_{o_{max}} = S_{o_{max}}^1$; $\lg K_m = K_m^1$; $\lg l_1 = l_1^1$ находим

$$H_0^1 = C + \alpha_h t^1 + \beta_h v^1 + \gamma_h S_{o_{max}}^1 + \varepsilon_h K_m^1 + \lambda_h l_1^1 \quad (4)$$

Используя условие Гаусса, можно получить следующие нормальные уравнения:

$$-\sum_1^n H^1 + \sum_1^n C + \alpha_h \sum_1^n t^1 + \beta_h \sum_1^n v^1 + \gamma_h \sum_1^n S_{o_{max}}^1 + \varepsilon_h \sum_1^n K_m^1 + \lambda_h \sum_1^n l_1^1 = 0 \quad (5)$$

$$-\sum_1^n t^1 H_0^1 + C \sum_1^n t^1 + \alpha_h \sum_1^n (t^1)^2 + \beta_h \sum_1^n v^1 t^1 + \gamma_h \sum_1^n S_{o_{max}}^1 t^1 + \varepsilon_h \sum_1^n K_m^1 t^1 + \lambda_h \sum_1^n l_1^1 t^1 = 0 \quad (6)$$

$$-\sum_1^n v^1 H_0^1 + C \sum_1^n v^1 + \alpha_h \sum_1^n t^1 v^1 + \beta_h \sum_1^n (v^1)^2 + \gamma_h \sum_1^n S_{o_{max}}^1 v^1 + \varepsilon_h \sum_1^n K_m^1 v^1 + \lambda_h \sum_1^n l_1^1 v^1 = 0 \quad (7)$$

$$-\sum_1^n S_{o_{max}}^1 H_0^1 + C \sum_1^n S_{o_{max}}^1 + \alpha_h \sum_1^n t^1 S_{o_{max}}^1 + \beta_h \sum_1^n v^1 S_{o_{max}}^1 + \gamma_h \sum_1^n (S_{o_{max}}^1)^2 + \varepsilon_h \sum_1^n K_m^1 S_{o_{max}}^1 + \lambda_h \sum_1^n l_1^1 S_{o_{max}}^1 = 0 \quad (8)$$

$$-\sum_1^n K_m^1 H_0^1 + C \sum_1^n K_m^1 + \alpha_h \sum_1^n t^1 K_m^1 + \beta_h \sum_1^n v^1 K_m^1 + \gamma_h \sum_1^n S_{o_{max}}^1 K_m^1 + \varepsilon_h \sum_1^n (K_m^1)^2 + \lambda_h \sum_1^n l_1^1 K_m^1 = 0 \quad (9)$$

$$-\sum_1^n l_1^1 H_0^1 + C \sum_1^n l_1^1 + \alpha_h \sum_1^n t^1 l_1^1 + \beta_h \sum_1^n v^1 l_1^1 + \gamma_h \sum_1^n S_{o_{max}}^1 l_1^1 + \varepsilon_h \sum_1^n K_m^1 l_1^1 + \lambda_h \sum_1^n (l_1^1)^2 = 0 \quad (10)$$

Решая эти уравнения, определяем неизвестные $C, \alpha_h, \beta_h, \gamma_h, \varepsilon_h, \lambda_h$.

На основании экспериментальных данных, представленных в табл. 1, получены следующие уравнения:

Таблица 1
Результаты экспериментальных исследований размерной стойкости режущего инструмента при точении с модулированной подачей

№ опыта	t , мм	v , м/мин	$S_{o_{max}}$, мм/об	K_m	l_1 , мм	h_0 , мкм/км
1	1,0	80	0,20	0,80	1,25	4,2
2	4,0	80	0,20	0,80	0,40	4,1
3	1,0	160	0,20	0,50	1,25	5,9
4	4,0	160	0,20	0,50	0,40	6,0
5	1,0	80	0,60	0,80	0,40	4,3
6	4,0	80	0,60	0,80	1,25	4,5
7	1,0	160	0,60	0,50	0,40	6,0
8	4,0	160	0,60	0,50	1,25	6,5
9	1,5	100	0,25	0,55	0,55	4,6
10	2,0	120	0,35	0,60	0,70	5,5
11	2,5	140	0,45	0,65	0,85	5,8
12	3,0	160	0,55	0,70	1,00	6,4

$$-8,6389 + 12C + 4,3621\alpha_h + 24,8577\beta_h - 5,3470\gamma_h - 2,4149\epsilon_h - 1,6890\lambda_h = 0 \quad (11)$$

$$-2,7478 + 3,7601C + 1,9571\alpha_h + 7,8285\beta_h - 1,6135\gamma_h - 0,7398\epsilon_h - 0,4828\lambda_h = 0 \quad (12)$$

$$-18,0043 + 24,8577C + 7,8225\alpha_h + 51,7044\beta_h - 10,0398\gamma_h - 4,9914\epsilon_h - 3,4541\lambda_h = 0 \quad (13)$$

$$3,7955 - 5,3470C - 1,6135\alpha_h - 10,0398\beta_h + 2,9068\gamma_h + 1,0952\epsilon_h + 0,8678\lambda_h = 0 \quad (14)$$

$$1,7365 - 2,4149C - 0,7398\alpha_h - 4,9914\beta_h + 1,0952\gamma_h + 0,5756\epsilon_h + 0,3546\lambda_h = 0 \quad (15)$$

$$1,1789 - 1,6890C - 0,4828\alpha_h - 3,4541\beta_h + 0,8678\gamma_h + 0,3546\epsilon_h + 0,7672\lambda_h = 0 \quad (16)$$

Решая систему шести уравнений с шестью неизвестными, находим их значения: $C = -0,3143$; $\alpha_h = 0,0241$; $\beta_h = 0,5098$; $\gamma_h = 0,0432$; $\epsilon_h = 0,0351$; $\lambda_h = 0,0287$. Тогда зависимость для определения относительного размерного износа резцов из твердого сплава Т15К6 при обработке конструкционной стали 45 с модулированной подачей будет иметь вид

$$h_0 = 0,485t^{0,024}v^{0,510}S_{0,max}^{0,043}K_A^{0,035}I_1^{0,029} \quad (17)$$

Аналогично, на основании экспериментальных данных (табл. 2) получена следующая зависимость для определения относительного размерного износа резцов при точении с прерыванием подачи

$$h_0 = 0,502t^{0,027}v^{0,539}S_{0,max}^{0,048}K_A^{0,021}K_B^{0,034} \quad (18)$$

Для процесса формообразования с прерыванием подачи параметры режима резания изменялись в следующих диапазонах: $t = 1,0 \dots 4,0$ мм; $v = 80 \dots 160$ м/мин; $S_{0,max} = 0,2 \dots 0,6$ мм/об; $K_A = 0,5 \dots 1,0$; $K_B = 1,0 \dots 4,0$.

Анализ зависимостей (17) и (18) показывает, что режим изменения подачи в функции пути оказывает заметное влияние на размерную стойкость режущего инструмента. Причем из параметров модулированной подачи наибольшее влияние на размерную стойкость оказывает верхнее пиковое значение подачи $S_{0,max}$. С увеличением $S_{0,max}$ размерная стойкость резцов уменьшается. При точении с прерыванием подачи размерная стойкость в значительной степени зависит от величины подачи на оборот $S_{0,max}$ и соотношения между коэффици-

Таблица 2
Результаты экспериментальных исследований размерной стойкости режущего инструмента при точении с прерыванием подачи

№ опыта	t , мм	v , м/мин	$S_{0,max}$, мм/об	K_A	I_1 , мм	h_0 , мкм/км
1	1,0	80	0,20	1,0	4,0	5,2
2	4,0	80	0,20	0,5	1,0	5,3
3	1,0	160	0,20	0,5	4,0	7,4
4	3,5	150	0,40	1,0	3,5	7,6
5	1,0	80	0,60	1,0	1,0	5,2
6	4,0	80	0,60	0,5	4,0	5,6
7	1,0	160	0,60	0,5	1,0	7,5
8	4,0	160	0,60	1,0	4,0	8,3
9	1,5	100	0,25	0,6	1,5	5,7
10	2,0	120	0,35	0,7	2,0	6,6
11	2,5	140	0,45	0,8	2,5	7,3
12	3,0	160	0,55	0,9	3,0	7,8

ентами K_A и K_B , определяющими частоту прерывания подачи и его продолжительность.

Полученные математические модели могут быть использованы для расчета величины составляющей погрешности обработки, вызванной износом режущего инструмента при нестационарных режимах резания, а также при создании систем управления устойчивостью технологической системы к автоколебаниям, возникающих в процессе формообразования нежестких деталей.

Литература

1. Подураев В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. — М.: Машиностроение, 1977. — 304 с.
2. Каштальян И. А. Физические параметры кинематически нестабильных процессов резания на токарных ГПМ // *Материалы, технологии, инструменты*. — 2003. № 2. — С. 63—67.
3. Каштальян И. А. Эффективные кинематически нестабильные процессы формообразования на токарных станках с ЧПУ // *Машиностроение*. — Мн., 2002. — Вып. 18. — С. 310—318.
4. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. — М.: Наука, 1968. — 288 с.
5. Медведев Д. Д. Новый метод установления зависимостей для определения размерного износа режущих инструментов // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1968. № 4. — С. 174—179.