

# Исследование процессов обработки

УДК 621.9.01

Ю. Г. Кравченко, А. А. Семькин,  
А. Я. Ярошик (г. Днепропетровск)

## **Оптимизация параметров процесса точения высокотвердых чугунов пластинами из ПКНБ**

*Получены эмпирические зависимости показателей процесса точения от переменных параметров, технических ограничений показателей и технологической себестоимости обработки. Выполнены расчеты режимов резания и геометрии лезвия пластин из поликристаллического кубического нитрида бора, проведен анализ влияния твердости чугунов и технических ограничений на оценочные показатели.*

**Ключевые слова:** *точение, резание, высокотвердые чугуны, поликристаллический кубический нитрид бора, параметры оптимизации.*

Существующие справочные данные по выбору режимов резания высокотвердых материалов и геометрии лезвия в целом отражают уровень производительности обработки и стойкости режущих инструментов (РИ) и носят рекомендательный характер по применимости поликристаллических сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора (ПКНБ), так как не могут учитывать конкретных технических, технологических и экономических требований к выполняемой операции.

Для расчета оптимальных параметров процесса резания необходимо создание математической модели, которая должна состоять из системы зависимостей показателей процесса от переменных (оптимизируемых) параметров, технических ограничений (ТО) этих показателей, области существования самих параметров и целевой функции (ЦФ) в качестве критерия оптимизации [1, 2]. Современная вычислительная техника и программное обеспечение позволяют решать задачи многофакторной оптимизации с экономической ЦФ методом нелинейного программирования.

Цель работы — оптимизировать режимные и геометрические параметры процесса полустогового и чистого точения отбеленных чугунов габаритными режущими пластинами из ПКНБ.

Обрабатываемыми материалами были низколегированные отбеленные чугуны исполнения с шаровидным ШХН ( $HB = 330—400$ ), пластинчатым ПХН

( $HB = 400—540$ ) графитом и высокохромистый износостойкий чугун ИЧ210Х28Г3С ( $HB = 540—610$ ).

Исследования показателей процесса выполняли сборными резцами [3, 4] высокой жесткости с регулировочным выдвижением после заточки монолитной квадратной пластины SNMN 09047  $12,7 \times 12,7 \times 4,76$  мм из ПКНБ марки киборит и вставки с напайной пластиной на твердосплавной подложке  $\varnothing 15,9 \times 4,76$  мм из ПКНБ марки ниборит при неизменных углах в плане  $\varphi = \varphi' = 45^\circ$ , задних  $\alpha = \alpha' = 8^\circ$ , наклона режущих кромок  $\lambda = \lambda' = 8^\circ$  у квадратных и  $\lambda = \lambda' = 0^\circ$  у напайных пластин.

Показателями процесса служили тангенциальная  $P_z$ , радиальная  $P_y$  и осевая  $P_x$  составляющие силы резания, температура резания  $\theta$ , период стойкости лезвия  $T$ , вероятность неразрушения режущей кромки  $P_T$  и высотный параметр шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ .

Основу математической модели составляли полученные [5—7] эмпирические зависимости показателей процесса точения  $\Pi$  от параметров режима резания (глубины  $t$ , подачи  $S$  и скорости  $v$ ), геометрии лезвия (переднего угла  $\gamma$ , радиуса вершины  $r$  и величины износа по задней поверхности  $h$ ) и твердости чугунов  $HB$  в удобном при расчетах структурном виде [2]:

$$\Pi = c_{\Pi} t^x S^y v^z \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)^{\eta} (1+r)^v (1+h_3)^u \left(\frac{HB}{200}\right)^q K_{\text{оп}} K_{\text{инП}} \quad (1)$$

с коэффициентом размерно-параметрической пропорциональности  $c_{\Pi}$  и поправочными коэффициентами на марку обрабатываемого  $K_{\text{оп}}$  и инструментального  $K_{\text{инП}}$  материалов.

Базовыми обрабатываемым и инструментальными материалами с  $K_{\text{оп}} = 1$  и  $K_{\text{инП}} = 1$  приняты низколегированные чугуны и ПКНБ марки киборит.

Значения показателей степени и соответствующих коэффициентов (1) приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Значения коэффициентов и показателей степени зависимости (1)**

Показатели процесса $\Pi$	$c_{\Pi}$	$x$	$y$	$z$	$\eta$	$v$	$u$	$q$	$K_{\text{оп}}$ (высокохромистый чугун)	$K_{\text{инП}}$ (ПКНБ ниборит)
$P_z$ , Н	883,8	0,85	0,68	-0,15	0,6	0,15	0,6	0,55	1,2	
$P_y$ , Н	369,2	0,92	0,60	-0,11	1,4	0,23	1,5	1,15	1,25	
$P_x$ , Н	330,0	1,0	0,54	-0,11	1,2	-0,19	1,3	0,85	1,25	
$\theta$ , °С	426,8	0,1	0,19	0,3	0,4	-0,2	0,6	0,65	1,1	
$T$ , мин	29,26	-0,3	-0,75	-1,55	-0,75	0,11	$\tau(h)$	-1,4	0,8	0,75
$P_T$	-3,376	0,1	0,8	0,3	-4,5	-0,4	$p(h)$	1,5	1,5	0,7
$Ra$ , мкм	19,83	0,1	1,15	-0,18	-0,1	-0,55	0,6	-0,2	1,3	

Примечание.  $\tau(h) = h(1 + 25,8h - 27,8h^2 + 8,0h^3)$ ;

$$P_T = \exp[-c_{\Pi} t^x \dots \cdot p(h) \dots \cdot K_{\text{оп}} K_{\text{инП}}];$$

$$p(h) = h(1 - 3,44h + 6,12h^2 - 5,49h^3 + 2,03h^4) [7].$$

С учетом эксплуатационных свойств ПКНБ [5, 7, 8] и данных табл. 1 для операций получистового и чистового точения выбраны соответственно ниборит (на металлической связке, имеет в сравнении с киборитом большую прочность, более эффективный при работе с увеличенными сечениями среза) и киборит (на керамической связке, обладает в сравнении с ниборитом большей износостойкостью, более эффективный при работе с повышенными скоростями резания).

Для каждого из показателей процесса точения применяли следующие ТО с исходными данными для их расчета.

Мощность резания из условия долговечности станка не должна превышать три четверти мощности главного привода:

$$N = P_z v \leq 0,75 |N_{\text{п}}| \eta, \quad (2)$$

где  $|N_{\text{п}}| = 15000$  Вт; к. п. д. передачи  $\eta = 0,85$ .

Деформация (изгиб) державки резца  $f_{\text{и}}$  ограничивает тангенциальную составляющую силы резания:

$$P_z \leq |f_{\text{и}}| \cdot \frac{3E_{\text{и}} I_{\text{и}}}{10^6 L_{\text{и}}^3}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{и}} = \frac{BH^3}{12}$  — момент инерции сечения державки шириной  $B = 32$  мм и высотой  $H = 40$  мм;  $E_{\text{и}} = 200 \cdot 10^9$  Па — модуль упругости стали державки;  $L_{\text{и}} = 75$  мм — длина вылета стержневого резца;  $|f_{\text{и}}|$  равна 0,02 и 0,01 мм для получистового и чистового точения соответственно.

Упругая деформация (прогиб) заготовки  $f_3$  зависит от радиальной составляющей силы резания:

$$P_y \leq |f_3| \frac{K_3 E_3 I_3}{10^6 L_3^3}, \quad (4)$$

где  $I_3 = 0,05D^4$  — полярный момент инерции сечения;  $D = 200$  мм — диаметр заготовки;  $E_3 = 130 \cdot 10^9$  Па — модуль упругости материала заготовки;  $K_3 = 110$  — коэффициент, учитывающий способ закрепления заготовки в технологической системе резания (в патроне с поддержкой задним центром);  $L_3 = 1500$  мм — общая длина заготовки;  $|f_3|$  ограничивали величинами 0,02 и 0,01 мм для получистового и чистового точения соответственно.

Осевая составляющая силы резания связана с прочностью механизма подачи станка неравенством

$$P_x \leq 0,75 |P_{\text{м.п}}|. \quad (5)$$

Здесь  $|P_{\text{м.п}}| = 9000$  Н.

Температура резания должна быть меньше критической теплостойкости инструментального материала:

$$\theta \leq 0,9 |\theta_{\text{т}}|. \quad (6)$$

Для ниборита на металлической связке температура  $|\theta_{\text{т}}| = 1100$  °С, для киборита на керамической связке  $|\theta_{\text{т}}| = 1300$  °С [8].

Период стойкости для обеспечения рациональной эксплуатации РИ должен быть больше нормативного:

$$T \geq |T_n|, \quad (7)$$

$|T_n|$  принимали равным 45 и 60 мин для ниборита и киборита соответственно.

Вероятность неразрушения режущей кромки за период стойкости принимали соответственно допустимому значению вероятности безотказной работы необслуживаемых простых технических систем:

$$P_T \geq |P_T|, \quad (8)$$

$|P_T|$  соответствовала 0,8 и 0,85 для получистового и чистового точения.

Площадь обработанной поверхности  $F_o = 600SvTP_T$  должна превышать площадь поверхности заготовки  $F_3 = \pi DLn_n/100$  ( $L$  — длина обрабатываемой поверхности;  $n_n$  — число проходов за один период стойкости резца; в данном случае  $L = 750$  мм,  $n_n = 1$ ):

$$F_o > |F_3|. \quad (9)$$

Параметр шероховатости назначали согласно нормам технологического обеспечения требованиям чертежа детали:

$$Ra \leq |Ra|, \quad (10)$$

для получистового и чистового точения  $|Ra| = 5$  и  $2,5$  мкм соответственно.

Область существования оптимизируемых параметров:

$$X_i \min \leq |t, S, v, \gamma, r, h| \leq X_i \max. \quad (11)$$

Пределы значений режимных и геометрических параметров:  $t = 1—2$  и  $0,5—1$  мм для получистового и чистового точения;  $S = 0,1—0,5$  мм/об;  $v = 0,5—2,5$  м/с;  $\gamma = (-30)—0^\circ$ ;  $r = 0,8—3,2$  и  $0,8—1,6$  мм для ниборита и киборита;  $h = 0,2—0,8$  мм.

Эффективность эксплуатации РИ наиболее комплексно оценивается переменными составляющими технологической себестоимости обработки  $C_T = C_c + C_n + C_s$ , основные затраты которой связаны с амортизацией станка и заработной платой рабочего ( $C_c$ ), эксплуатацией инструмента ( $C_n$ ) и расходом силовой энергии ( $C_s$ ). Поэтому ЦФ оптимизационной модели была принята удельная себестоимость обработки [9]

$$C_y = \frac{\left(1 + \varepsilon + \frac{\tau_c}{TP_T}\right) K_o c_m + \frac{I + 3}{TP_T} + [N + N_n(1 + \varepsilon)(1 + K_n - \eta)] c_s}{60tSv}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon = 0,15$  — коэффициент, связанный с дополнительным временем на технологические переходы;  $\tau_c = 2$  мин — время на смену и настройку РИ;  $K_o = 1,07$  — коэффициент, зависящий от затраты времени на обслуживание станка;  $N, N_n, \eta$  — см. выражение (2);  $K_n = 0,2$  — отношение мощности привода подачи и вспомогательных механизмов к мощности главного привода;  $c_m$  — стоимость станкоминуты работы станка и рабочего;  $I$  — стоимость РИ, приходящаяся на один период стойкости;  $3$  — стоимость заточки;  $c_s = 3,33 \cdot 10^{-6}$  у.д.е./(Вт·мин) — стоимость электроэнергии.

Формула (12) включает стоимость станкоминуты работы станка и заработной платы рабочего

$$c_m = \frac{C_c a_c}{60 \Phi_r K_{3,c}} + \frac{Z_p K_n}{60 \Phi_m}. \quad (13)$$

Здесь  $C_c = 30000$  у.д.е. — стоимость токарного станка,  $a_c = 0,075$  — норма амортизационных отчислений,  $\Phi_r = 4015$  ч — годовой фонд времени двухсменной работы,  $K_{3,c} = 0,85$  — коэффициент загрузки станка,  $Z_p = 500$  у.д.е. — месячная зарплата рабочего-станочника,  $K_n = 1,2$  — коэффициент надбавки,  $\Phi_m = 164$  ч — месячный фонд рабочего времени. Таким образом,  $c_m = 0,072$  у.д.е./мин.

Заграты  $C_n$  (12) состоят из приходящейся на один период стойкости стоимости РИ (пластины)

$$И = \frac{C_n K_y}{(1+i)n_b} \quad (14)$$

и стоимости заточки

$$З = \frac{\tau_3 c_3 + \frac{C_k}{i_k}}{n_b}, \quad (15)$$

где  $C_n = 30$  (ниборит) и  $50$  (киборит) у.д.е. — цена режущей пластины (инструмента);  $K_y = 1,15$  — коэффициент случайной убыли;  $n_b = 1$  (ниборит) и  $4$  (киборит) — число вершин пластины;  $\tau_3 = 5$  и  $10$  мин (ниборит и киборит) — штучное время на заточку;  $c_3 = 0,064$  у.д.е./мин — стоимость станкоминуты заточки (13) (цена заточного станка  $C_3 = 6900$  у.д.е., амортизационные отчисления от стоимости заточного станка  $a_3 = 0,103$ , зарплата рабочего-заточника  $Z_3 = 500$  у.д.е.);  $C_k = 200$  у.д.е. — цена заточного алмазного круга;  $i_k = 200$  для ниборита и  $75$  для киборита — число заточек одним кругом;  $З = 1,32$  и  $0,82$  у.д.е. для ниборита и киборита.

Количество заточек пластины в (14) определяется из выражения [7]

$$i = BK_B \frac{[P_T (K_p - 1) + 1] \delta + \Delta}{(K_p \delta + \Delta)(\delta + \Delta)}, \quad (16)$$

которое учитывает ширину пластины в направлении заточки  $B = 14$  (ниборит) и  $12,7/2$  (киборит) мм, коэффициент использования пластины  $K_B = 2/3$  (ниборит) и  $1/3$  (киборит), величину естественного износа лезвия в основной плоскости в направлении главной секущей плоскости  $\delta = \frac{h \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \alpha}$ , коэффициент

превышения глубины разрушения лезвия над величиной  $\delta$  износа  $K_p = 4$ , технологический припуск на заточку  $\Delta = 0,1$  мм.

Результаты расчетов по значениям исходных данных (2)—(16), выполненных на ПЭВМ с использованием программного продукта MathCad, сведены в табл. 2.

Дополнительными оценочными показателями при анализе эффективности процесса точения в зависимости от условий обработки служили производительность обработки

$$Q = 60tSv \quad (17)$$

и ресурс режущей пластины

$$R = TP_T (1+i)n_b. \quad (18)$$

**Таблица 2. Оптимальные значения параметров процесса точения**

Назначение операции, марка ПКНБ	Твердость чугунов, <i>HB</i>	Режим резания			Геометрия лезвия			Оценочные показатели		
		<i>t</i> , мм	<i>S</i> , мм/об	<i>v</i> , м/с	$\gamma$ , град	<i>r</i> , мм	<i>h</i> , мм	<i>Q</i> , см <sup>3</sup> /мин	<i>R</i> , мин	<i>C<sub>y</sub></i> , у.д.е./см <sup>3</sup>
Получистовое точение, ниборит	400	2	0,5	1,42	-11,4	3,2	0,8	85,1	1445	0,0022
	540			1,04	-19,8			62,4	1462	0,0030
	610	1,46	0,4	0,70	-26,1			24,2	2328	0,0065
Чистовое точение, киборит	400	1	0,24	2,10	-19,7	1,6	0,8	31,5	2099	0,0051
	540		0,25	1,55	-28,9			23,2	2120	0,0069
	610		0,17	0,82	-30		0,72	8,6	4799	0,0150

При принятых исходных данных для  $T_0$  и  $C_y$  ограничивающими показателями процесса оказались  $T$ ,  $P_T$ ,  $Ra$  для низколегированных чугунов и  $P_T$ ,  $Ra$  (экономическая ЦФ предопределила большие периоды стойкости  $T = 71$  и  $128$  мин для получистового и чистового точения) для высокохромистого чугуна. Расчетные величина износа лезвия в основной плоскости и количество заточек (16) соответствовали  $\delta = 0,104—0,109$  мм,  $i = 39,1—40,0$  для резцовой вставки из ниборита и  $i = 9,3—10,0$  для пластины из киборита с  $n_b = 4$  (имеем примерно равное число заточек). Общая тенденция обеспечения наименьшей  $C_y$  заключается в применении максимально допустимых глубины  $t$ , радиуса  $r$  и величины износа в плоскости резания  $h$ .

С увеличением твердости чугунов отмечено существенное уменьшение скорости  $v$  и переднего угла  $\gamma$ , а при чистовом точении в сравнении с получистовым — значительное снижение подачи  $S$ , увеличение скорости  $v$  и уменьшение переднего угла  $\gamma$ . В целом увеличение твердости чугунов  $HB$  с 400 у низколегированного до 610 у высокохромистого приводит к снижению производительности  $Q$  в 3,52—3,66 раз, увеличению ресурса пластин  $R$  в 1,61—2,28 раз и удельной себестоимости обработки  $C_y$  в 2,94—2,95 раз. В сравнении с получистовым точением при чистовом из-за более жестких  $T$ ,  $P_T$ ,  $Ra$  происходит снижение в 2,69—2,81 раз производительности  $Q$  и увеличение в 1,45—2,06 и 2,30—2,32 раза соответственно ресурса  $R$  и удельной себестоимости  $C_y$ .

Важнейшим достоинством данной методологии является ее способность оптимизировать геометрические параметры лезвия и по экономически обоснованной величине износа  $h$  как аргумента функций периода стойкости  $T$ , вероятности неразрушения  $P_T$  и количества заточек  $i$  обеспечивать максимальный ресурс дорогостоящих пластин из ПКНБ.

1. Якобс Г. Ю., Якоб Э., Кохан Д. Оптимизация резания / Пер. с нем. — М.: Машиностроение, 1981. — 279 с.
2. Кравченко Ю. Г., Пиньковский С. Г., Савченко Ю. В. Постановка задачи оптимизации параметров процесса резания металлов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. — Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. — Вып. 68.— С. 273—275.
3. А. с. 1710203 СССР, МПК В 23 В 27/16. Сборный резец с перетачиваемой пластиной / Ю. Г. Кравченко, О. В. Архипов. — Оpubл. 02.07.92, Бюл. № 5.

4. А. с. 1773573 СССР, МПК В 23 В 27/16. Сборный резец / Ю. Г. Кравченко, О. В. Архипов. — Оpubл. 11.07.92, Бюл. № 41.
5. Кравченко Ю. Г. Рациональные условия точения чугунных прокатных валков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 1997. — № 2. — С. 57—60.
6. Дидык Р. П., Кравченко Ю. Г., Мелещик В. А. Силы и температура резания при точении композитами износостойких чугунов // *Национальная горная академия Украины: Сб. науч. тр.* — Днепропетровск: Навчальна книга, 2002. — № 13, т. 2. — С. 114—117.
7. Кравченко Ю. Г., Савченко Ю. В. Надежность режущих пластин из композитов при точении отбеленных чугунов // *Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр.* — Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. — Вип. 1 (10). — С. 99—104.
8. *Инструменты из сверхтвердых материалов* / Под ред. Н. В. Новикова. — Киев: ИСМ НАНУ, 2001. — 528 с.
9. Кравченко Ю. Г., Савченко Ю. В. Расчет удельной себестоимости обработки при точении // *Национальный горный университет: Сб. науч. тр.* — Днепропетровск: НГУ, 2004. — № 19, т. 4. — С. 88—91.

Национальная металлургическая академия Украины

Поступила 11.02.08