

УДК 621.9.02

А.С. Манохин, к.т.н.

С.А. Клименко, д.т.н., проф.

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля
НАН Украины*

СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ СТАЛИ ШХ15 БЕЗВЕРШИННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ КИБОРИТА

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния на силы резания условий косоугольного точения стали ШХ15 твердостью 60–62 и 34–36 HRC однокромочным резцом, оснащенным поликристаллическим сверхтвердым материалом на основе кубического нитрида бора «киборит».

Вступление. Величина силы резания – один из важнейших технологических показателей, характеризующих процесс обработки резанием. Для задач оптимизации и эффективного управления процессами обработки необходимо определить значения этого показателя в зависимости от условий обработки – режимов резания, вида обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента. Особенно важны величины сил резания для такого «чувствительного» к условиям обработки метода чистового точения как косоугольное резание однокромочным инструментом («бреющее» резание), так как при обработке закаленных сталей с большими сечениями среза сила резания может являться причиной снижения качества обработки при недостаточной жесткости системы СПИД.

До настоящего времени в технической литературе представлено незначительное количество результатов исследований косоугольного резания сталей, в том числе высокой твердости, однокромочным инструментами, оснащенным поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) [1, 2]. В тоже время, такая обработка является перспективной как с точки зрения значительного повышения производительности, так и обеспечения требуемого качества изделий, особенно крупногабаритных [3].

Целью настоящей работы было экспериментальное изучение влияния условий обработки однокромочным инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ, на силы резания при точении стали.

Экспериментальные исследования. Исследования проводились на токарно-винторезном станке ФТ–11, для измерения составляющих силы резания использовался трехкомпонентный динамометр УДМ–600,

показания которого записывались в память ЭВМ. Необходимый угол наклона режущей кромки обеспечивался с помощью поворотного резца, закрепленного в резцедержателе динамометра. Режущий инструмент оснащался пластинами из ПСТМ на основе КНБ киборит с формо-размерами SNUN-120804T и SNUN-120804. Передний и задний углы резца в нормальном к режущей кромке сечении составляли $\gamma = -10^\circ$ и $\alpha = 10^\circ$. Обрабатывалась сталь ШХ-15 твердостью 60–62 и 34–36 НRC. Глубина резания – $t = 0,025$ мм.

Варьируя подачу и угол наклона таким образом, чтобы величина средней толщины среза составляла $a = 5-8$ мкм, обеспечивались условия, при которых напряжения в режущем инструменте определялись, главным образом, нагрузкой на участке износа резца. При измерении сил, действующих на задней поверхности резца, опыты проводились при скорости $v = 0,96$ м/с и максимальной величине фаски износа 0,2 мм. Результаты расчетов и измерений представлены в табл. 1. При расчете средних напряжений учитывалась действительная форма поверхности износа со стороны задней поверхности инструмента – при косоугольном точении она близка к параболической и определяется как $F = 0,67Lh_3$ (где L , h_3 – рабочая длина режущей кромки и износ инструмента по задней поверхности соответственно).

Таблица 1
Силы резания на задней поверхности инструмента

S , мм/об.	λ°	L , мм	P_{z3} , Н	P_{y3} , Н	P_{z3} , Н	P_{y3} , Н (расч.)*	P_{z3} , Н (расч.)*	μ	q_{NZ} , МПа	q_{FZ} , МПа
2,28	20	5,5	145	1300	380	1354	379	0,292	1774	491
1,52	30	3,57	117	916	234	953	267	0,255	1924	460
0,48	40	2,71	72	650	170	673	188	0,262	1791	431
0,34	50	1,95	52	309	123	–	–	0,154	3320	473

* Расчет производился по методике, представленной в [4]

Как видно из табл. 1, отклонение расчетных и экспериментальных значений сил резания P_{y3} и P_{z3} при углах наклона $\lambda = (20-40)^\circ$ не превышает 3,5 %.

С увеличением угла λ до 50° нормальные напряжения на задней поверхности резца возрастают до величины 3320 МПа, что существенно превышает значения q_{NZ} , в диапазоне углов $\lambda = (20-40)^\circ$.

Для уточнения значений q_{NZ} , полученных при $\lambda = 50^\circ$, проведено измерение составляющих силы резания, используя инструменты с различной шириной фаски износа h_3 . В этом случае, при прочих равных условиях, приращение технологических составляющих силы резания с увеличением h_3 обусловлено возрастанием составляющих силы резания, действующих на задней поверхности инструмента. Данные измерений

составляющих P_x, P_y, P_z при $\lambda = 50^\circ$ приведены в табл. 1. С учетом известных геометрических параметров контактной площадки на задней поверхности инструмента, можно рассчитать величины нормального давления, а также составляющих удельной силы трения, действующих в тангенциальном и осевом направлениях.

По расчетным данным значение q_{NZ} составляет 3325–3482 МПа. Существенный рост величины q_{NZ} при увеличении λ до 50° объясняется тем, что с ростом последнего увеличивается и радиус округления режущей кромки резца ρ_1 , определяемый в нормальной секущей плоскости в соответствии с выражением $\rho_1 = \rho / \cos^2 \lambda$ (рис. 1). Обработываемый материал, подминаемый режущей кромкой, перемещаясь в направлении вектора скорости резания, испытывает при больших значениях радиуса округления большую степень деформации и, соответственно, большее упрочнение. При упругом восстановлении материала это приводит к большим контактным давлениям на задней поверхности инструмента (табл. 2). Касательные напряжения, действующие в тангенциальном (q_{FZ}) и осевом (q_{FZX}) направлениях, изменяются не столь значительно. Величина q_{FZ} составляет 460–490 МПа при $\lambda = (20-30)^\circ$ и 520–580 МПа при 50° , а q_{FZX} 190–224 и 206–249 МПа при $\lambda = (20-30)^\circ$ и 50° соответственно.

На рис. 2–7 представлены результаты измерений составляющих силы резания (P_x, P_y, P_z), полученные при различных условиях обработки закаленной стали.

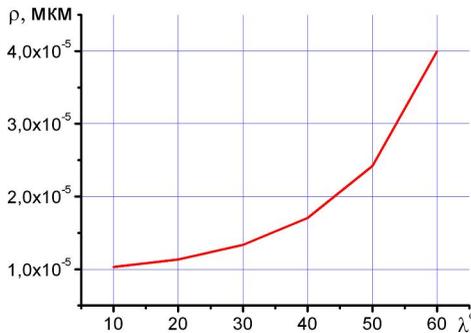


Рис. 1. Влияние угла наклона режущей кромки на фактический радиус округления режущей кромки ($\rho_{\text{факт}} = 10 \text{ мкм}$)

Таблица 2

Силы резания на задней поверхности инструмента*

$h_z,$ мм	$L,$ мм	$t,$ мм	$P_x,$ Н	$P_y,$ Н	$P_z,$ Н	μ	$q_{FZ},$ МПа	$q_{NZ},$ МПа	$q_{FZ},$ МПа
--------------	------------	---------	-------------	-------------	-------------	-------	------------------	------------------	------------------

0,02	3,72	0,1	392	676	396	0,18	249	3482	580
0,22	3,72	0,1	209	3202	817				
0,02	2,7	0,05	222	507	284	0,16	206	3425	521
0,22	2,7	0,05	113	2315	559				

* $S = 0,34$ мм/об.; $\lambda = 50^\circ$; λ°

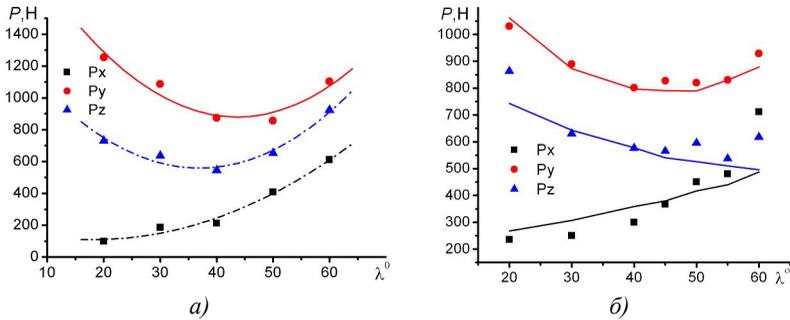


Рис. 2. Зависимость составляющих силы резания от угла наклона режущей кромки ($S = 0,67$ мм/об; $t = 0,1$ мм; $v = 1,1$ м/с):
 $a - h_3 = 0,05$ мм; $b - h_3 = 0,025$ мм

Снижение нормальных контактных напряжений, увеличение угла схода стружки по передней поверхности инструмента и, соответственно, уменьшение коэффициента трения в нормальном к режущей кромке сечении приводит к росту угла сдвига и снижению сил N_p и F_N , которые определяют величину тангенциальной и радиальной составляющей силы на передней поверхности резца. При этом сила, действующая в направлении оси детали, возрастает (рис. 2, а).

Уменьшение с ростом λ длины активной части режущей кромки является также причиной интенсивного снижения сил P_{xz} и P_{yz} (рис. 2, б) в диапазоне $\lambda = (20-40)^\circ$. Однако при дальнейшем росте угла наклона режущей кромки до $(50-60)^\circ$ на величину сил резания начинает оказывать существенное влияние увеличение радиуса округления режущей кромки ρ_k и одновременное снижение кинематического заднего угла. Совместное действие указанных факторов приводит к росту площади контакта обрабатываемого материала с задней поверхностью инструмента и, при интенсификации напряжений на задней поверхности инструмента, обуславливает рост величины сил P_x , P_y , P_z . Интенсивность роста составляющих силы резания с увеличением угла λ в диапазоне $50-60^\circ$ тем выше, чем больше величина фаски износа инструмента по задней поверхности инструмента.

Оценивая влияние угла наклона режущей кромки на соотношение составляющих силы резания, отметим, что при обработке острозаточенным инструментом с $\lambda = (55-60)^\circ$ характерным является превышение составляющей P_x по отношению к составляющей P_y . В то время, для приработанного инструмента с фаской износа $h_3 = 0,05$ мм, $P_y > P_x$ во всем диапазоне углов наклона λ (рис. 2 а, б). Отметим также, что отношение P_y к P_z больше единицы при любых величинах λ и h_3 .

Увеличение подачи обуславливает рост толщины среза, что приводит к увеличению сил, действующих на передней поверхности инструмента. Силы, как на передней, так и на задней поверхностях инструмента, увеличиваются также вследствие возрастания рабочей длины режущей кромки. Чем выше степень износа инструмента, тем меньше интенсивность роста составляющих силы резания. Указанное объясняется тем, что при большой ширине фаски износа инструмента их рост связан, в основном, с увеличением длины контакта и интенсификацией контактного взаимодействия на задней поверхности инструмента. Для острого инструмента ($h_3 \leq 0,025$ мм) влияние увеличения толщины среза и площади контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью реза более выражено (рис. 3, а, б).

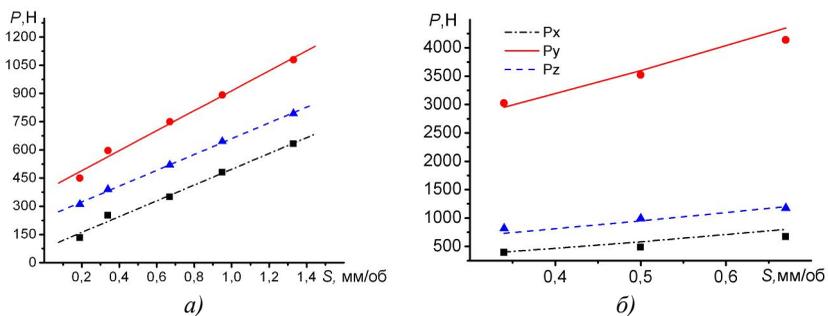


Рис. 3. Зависимость составляющих силы резания от подачи ($\lambda = 50^\circ$; $t = 0,1$ мм; $v = 1,1$ м/с): а – $h_3 = 0,05$ мм; б – $h_3 = 0,025$ мм

Аналогичным образом влияет на силы резания глубина резания (рис. 4, а, б).

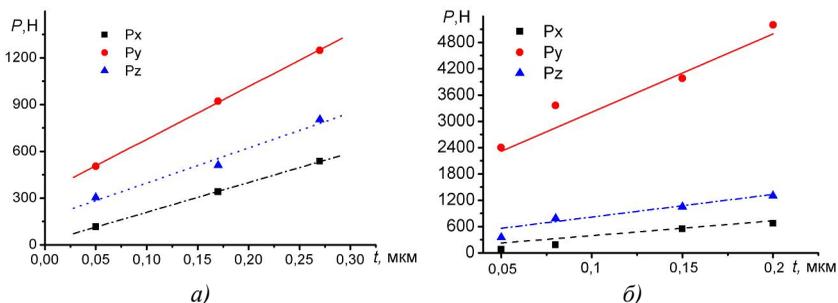


Рис. 4. Зависимость составляющих силы резания от глубины резания ($\lambda = 50^\circ$; $S = 0,38$ мм/об; $v = 1,1$ м/с):
 $a - h_3 = 0,02$ мм; $b - h_3 = 0,22$ мм

В сравнении с увеличением подачи, рост глубины резания оказывает более существенное влияние на параметр L при меньшем увеличении толщины среза. Соответственно при малых углах наклона кромки резца ($\lambda = (10-30)^\circ$) с увеличением глубины резания силы на задней поверхности будут возрастать в большей степени, чем силы, действующие на передней поверхности. При больших величинах $\lambda = (40-60)^\circ$ соотношение между приращениями сил на передней и задней поверхностях противоположно. Как и в случае с увеличением подачи, с ростом глубины резания приращение составляющих силы резания является более интенсивным для острозаточенного инструмента – P_x в 5,6, P_y в 2,8, P_z в 3,2 раза при увеличении глубины от 0,05 до 0,2 мм (рис. 4, а), тогда как при износе инструмента h_3 до 0,22 мм относительный прирост величин сил резания значительно меньше – P_x в 2,8, P_y в 2,04, P_z в 2,2 (рис 4, б).

При обработке инструментом без упрочняющей фаски, силы резания несколько ниже – при $\lambda = 50^\circ$; $S = 0,34$ мм/об.; $t = 0,1$ мм; $v = 1,1$ м/с; $h_3 = 0,02$ мм составляющая P_x уменьшается на 58 Н, P_y на 104 Н и P_z на 183 Н (все составляющие меньше приблизительно в 1,4 раза) (рис. 5). Оценивая влияние глубины резания на величину сил при различных углах наклона режущей кромки, отметим, что для острозаточенного инструмента при $\lambda = 60^\circ$ величина составляющей P_x больше, а интенсивность ее роста выше в сравнении с силой P_z , тогда как при $\lambda = 30^\circ$ наблюдается противоположная картина (рис. 6).

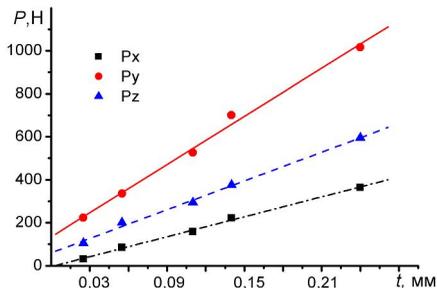
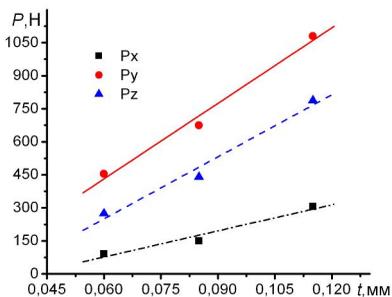


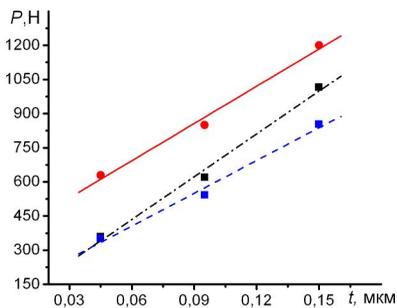
Рис. 5. Зависимость составляющих силы резания от глубины резания ($\lambda = 50^\circ$; $S = 0,38$ мм/об.; $v = 1,1$ м/с; $h_3 = 0,02$ мм). Режущий инструмент без упрочняющей фаски

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что фаска износа инструмента по задней поверхности является фактором, в значительной мере влияющим на величину составляющих сил резания. Зависимости сил от h_3 показаны на рис. 7.

Увеличение скорости резания приводит к снижению всех составляющих силы резания, при этом сила P_z уменьшается более интенсивно, чем сила P_y (19 % и 11 % соответственно).



а)



б)

Рис. 6. Зависимость составляющих силы резания от глубины резания ($S = 0,95$ мм/об.; $h_3 = 0,02$ мм): а – $\lambda = 30^\circ$; б – $\lambda = 60^\circ$

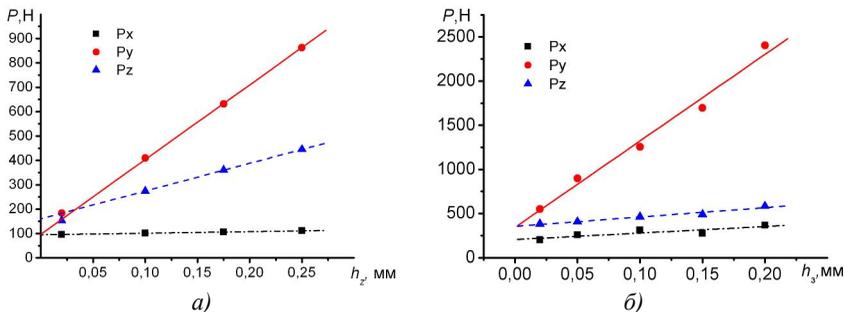


Рис. 7. Зависимость составляющих силы резания от фаски износа ($\lambda = 50^\circ$; $S = 0,38$ мм/об.; $t = 0,1$ мм; $d = 70$ мм):
 а – HRC = 36–38; б – HRC = 60 – 62

На рис. 7, 8 показано влияние твердости обрабатываемого материала на величину сил резания инструментами с упрочняющей фаской и без нее. Влияние твердости обрабатываемого материала выражается в росте составляющих силы резания и перераспределении соотношений между ними. При твердости 36 HRC отношение P_y/P_z составляет 1,1 и 0,8, достигая при 60 HRC величины 1,8 и 1,7 для режущих инструментов с фаской и без фаски соответственно. Для резца с фаской, при заданных условиях, составляющая P_y в 1,5, а P_z в 1,17 раза выше, в сравнении с режущими инструментами без фаски.

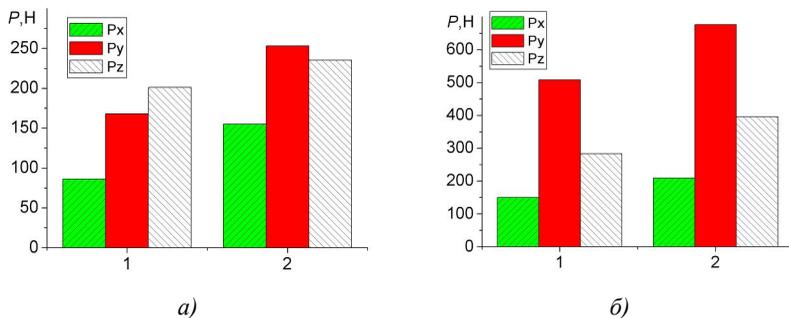


Рис. 8. Влияние состояния инструмента на величины сил резания: 1 – острозаточенный инструмент; 2 – инструмент с упрочняющей фаской ($\lambda = 50^\circ$; $S = 0,38$ мм/об.; $t = 0,1$ мм; $v = 0,96$ м/с; $h_z = 0,02$ мм). Твердость материала: а – 36 HRC; б – 60–62 HRC

Увеличение радиуса округления режущей кромки до 80–100 мкм оказывает качественно такое же влияние, что и наличие упрочняющей фаски – в сравнении с обработкой инструментами типа SNUN 120804 ($\rho = 10$ –15 мкм) силы P_y и P_z увеличиваются в 1,8 и 1,2 раза соответственно

(рис. 9), а их соотношение становится больше единицы (увеличивается в 1,24 раза).

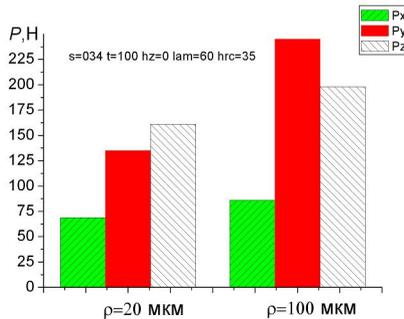


Рис. 9. Влияние величины округления режущей кромки на составляющие силы резания (твердость материала 36–38 HRC; $\lambda = 50^\circ$; $S = 0,67$ мм/об.; $t = 0,1$ мм; $v = 1,0$ м/с)

Нужно отметить, что увеличение радиуса округления до 80–100 мкм в большей мере сказывается на величине сил резания, чем наличие упрочняющей фаски с $\gamma_f = -20^\circ$, что связано с малой толщиной срезаемого слоя – при принятых условиях расчетное значение средней толщины среза составляет 18 мкм.

Выводы. Экспериментальными исследованиями установлено, что косоугольная обработка закаленной стали однокромочным инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ, характеризуется высокими значениями силы резания. При обработке стали ШХ 15 (60–61 HRC) в диапазоне рекомендуемых условий обработки составляющие силы резания находятся в пределах: $P_x = 400\text{--}600$ Н; $P_y = 900\text{--}4000$ Н; $P_z = 500\text{--}1200$ Н. Зависимость силы резания от угла наклона режущей кромки является экстремальной с минимумом при $\lambda = 50^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зубарь В.П. Перспективы применения синтетических сверхтвердых материалов в лезвийной обработке / В.П. Зубарь // Резание и инструмент: сб. науч. тр. – 1981. – Вып. 26. – С. 48–50.
2. Шероховатость обработанной поверхности при точении закаленной стали безвершинными резцами из гексанита-Р / А.В. Остроухов, Б.А. Перепелица и др. // Резание и инструмент : сб. науч. тр. – 1987. – Вып. 37. – С. 68–71.

3. *Klimenko S.A.* Hard “Skiving” Turning / *S.A. Klimenko, A.S. Manokhin* / Journal of Superhard Materials. – 2009. – Vol. 31. – № 1. – P. 42–55.
4. *Клименко С.А.* Определение составляющих силы резания при “бреющем” точении / *С.А. Клименко, А.С. Манохин* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – Вип. 21. – С. 19–35.

КЛИМЕНКО Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты.

МАНОХИН Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты.

Подано 13.10.2009