

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гао Сицюань, Дин Юмей, Го Юнхун. [М]// Цифровая обработка сигналов: принципы, реализация и приложения. 2010. № 62-83. ISBN: 9787121107641
2. Ма Болин, Ли Даньхэн, Ян Хуахуэй. [М]// Функция комплексной переменной и интегральное преобразование. 2007. № 140- 153. ISBN: 9787309054125
3. Учияма Р., Чжан Сюэцзюнь, Фудзита Х. и др. Компьютерная диагностика для МРТ головного мозга и печени [J]// Лаборатория изображений. 2012(2). № 41-46. <https://doi.org/10.3169/itej.65.436>

Ди Чэнь (Китай), Дин Цзэжу (Китай),  
Ли Вэйхан (Китай), Жуй Минхань (Китай),  
Козлов Виктор Николаевич (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич,  
канд. техн. наук, доцент

## ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА НА ВЫДЕРЖИВАЕМЫЙ РАЗМЕР И ПРОЧНОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Черновая обработка предназначена для высокопроизводительного удаления большого припуска, является предварительной обработкой и поэтому не требует высокой точности выдерживаемого размера, что позволяет операторам станков на производстве допускать большой износ режущего инструмента, однако это приводит к увеличению вероятности его поломки.

В настоящее время практически всегда используются сменные многогранные пластины (СМП), или многогранные неперетачиваемые пластины (МНП) из твёрдого сплава. При резании износ происходит по всем поверхностям, но в наибольшей степени по задней поверхности. При этом образуется фаска длиной  $h_z$  (в англоязычной литературе  $h_f$ ) с задним углом на ней  $\alpha_h = 0^\circ$ , если длина фаски не превышает 0,75 мм [1-4]. При бóльшей длине фаски увеличивается вероятность скола СМП.

При появлении фаски износа на задней поверхности происходит увеличение силы резания, особенно радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$  составляющих. Увеличение силы  $P_y$  приводит к росту упругой деформации системы станок – приспособление – инструмент - деталь (СПИД). Это

вызывает увеличение диаметра обработанной поверхности и погрешности формы (отклонение от круглости и цилиндричности), погрешности расположения обработанной поверхности относительно базовой поверхности. Поэтому с уменьшением жёсткости системы СПИД увеличивается разница между настраиваемым и полученным диаметром.

При износе происходит не только увеличение длины фаски износа на главной задней поверхности, но и увеличение износа по вершине в радиальном направлении, или так называемого размерного износа  $h_{\Delta} = h_f \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}$ , где  $\alpha_{\text{в}}$  – величина заднего угла режущего инструмента у вершины. Обычно  $\alpha_{\text{в}} \approx \alpha$ . Совместное действие этих факторов приводит к более существенному увеличению диаметра обработанной поверхности заготовки.

Графики зависимости длины фаски износа на задней поверхности  $h_f$  (мм) от длительности обработки  $\tau$  (мин) при использовании твёрдосплавного инструмента обычно выглядят как прямые линии (рис. 1). Если требуется определить время работы инструмента до предельно допустимого износа  $h_{f \max}$ , то выполняется пересечение горизонтальной линии при этой длине фаски  $h_{f \max}$  до построенного графика при соответствующей скорости резания  $v$  и подачи  $s$  (на рис. 1 показано красными стрелками для  $v = 250$  м/мин и  $s = 0,52$  мм/об при  $h_{f \max} = 0,7$  мм).

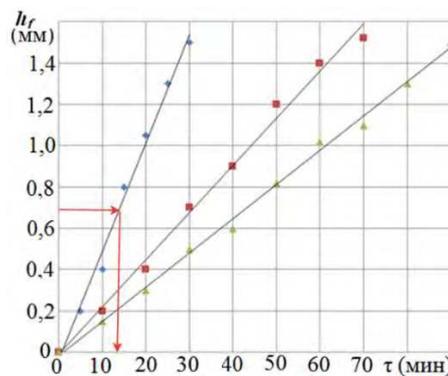


Рис. 1. Влияние времени резания  $\tau$  (мин) на длину фаски износа на задней поверхности  $h_f$  (мм). Сталь 40X - T15K6;  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ;  $\gamma = -7^\circ$ ;  $\alpha = 12^\circ$ ;  $r = 1$  мм,  $t = 2$  мм. ▲ –  $s = 0,13$  мм/об,  $v = 150$  м/мин;

■ –  $s = 0,52$  мм/об,  $v = 150$  м/мин;

◆ –  $s = 0,52$  мм/об,  $v = 250$  м/мин.

Исследования выполнялись на скоростях резания  $v = 150$  и  $250$  м/мин, в пределах которых обычно выполняется черновая обработка стали. Глубина резания меньше всего влияет на интенсивность

износа, поэтому эксперименты проводились при небольшой для черновой обработки глубине резания  $t = 2$  мм для экономии заготовок (обычно  $t = 2,5-4,5$  мм).

В качестве заготовок использовались прутки из стали 40Х с твёрдостью НВ 190-200. Исследования стойкости и изменения сил резания выполнялись с применением квадратных СМП с широко распространённой геометрией: главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $\varphi_1 = 45^\circ$ , главный передний угол  $\gamma = -7^\circ$ , главный задний угол  $\alpha = 12^\circ$ , радиус при вершине  $r = 1$  мм.

Для построения графиков  $h_f = f(\tau)$  (рис. 1.) производилась обработка с постоянной подачей и глубиной резания при неизменной скорости резания  $v$ . Через каждые 10 мин точение останавливалось, инструмент отводился от заготовки, и, не снимая его с резцедержателя, измерялась длина фаски износа на задней поверхности  $h_f$  с помощью портативного инструментального микроскопа «Мир» (трубки «Мир».

Увеличение подачи при одинаковой скорости резания приводит к увеличению интенсивности износа (рис. 1). Увеличение скорости резания при одинаковой подаче приводит к ещё большему увеличению интенсивности износа.

Составляющие  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  силы резания измерялись с помощью токарного динамометра Kistler. Затем рассчитывалась результирующая сил  $P_x$  и  $P_y$ :  $P_{xy} = (P_x^2 + P_y^2)^{1/2}$ , действующая в основной плоскости (для обычного токарного станка это горизонтальная плоскость).

Из наших экспериментов было выявлено, что на начальном этапе изнашивания (до  $h_f \leq 0,3$  мм) износ практически не влияет на силы резания. Это объясняется нами наличием прогиба поверхности резания под действием составляющей  $P_{xy}$  силы резания на передней поверхности [5]. При  $h_f > 0,6$  мм происходит очень интенсивное увеличение результирующей  $P_{xy}$  силы резания. Это вызывает увеличение вероятности скола СМП, поэтому на практике стараются не допускать длину фаски износа  $h_f$  более 0,75 мм.

Составляющие силы резания  $P_y$  и  $P_x$  увеличиваются более интенсивно по сравнению с  $P_z$ , что связано, по нашему мнению, с небольшим коэффициентом трения на фаске задней поверхности.

Изменение диаметра заготовки  $\Delta d_{упр}$  (мм) из-за её упругой деформации в результате увеличения радиальной составляющей силы резания  $P_y$  (Н) в процессе износа токарного резца можно рассчитать по формуле:

$$\Delta d_{упр} = 2 \cdot \Delta P_y / (J_{заг} + J_{спн}), \quad (1)$$

где:  $\Delta P_y$  – изменение радиальной составляющей силы резания  $P_y$  после увеличения длины фаски износа на задней поверхности на вели-

чину  $h_f$  (мм) по сравнению с острым резцом;  $J_{\text{заг}}$  – жёсткость заготовки (Н/мм);  $J_{\text{спи}}$  – суммарная жёсткость системы станок-приспособление-инструмент (Н/мм). Для обработки цилиндрической заготовки на токарном станке более конкретно  $J_{\text{спи}}$  – это жёсткость системы «шпиндельный узел станка - токарный патрон – инструмент – резцедержатель - продольный суппорт».

Наши исследования показали, что наименьшую жёсткость у токарного станка нормальной точности имеет резцедержатель (5 000 Н/мм) и шпиндельный узел (50 000 Н/мм).

Жёсткость заготовки зависит от способа её закрепления, её диаметра и длины. Наибольшее отклонение  $y_{\text{заг max}}$  (мм) от начального положения под действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  имеется у правого торца при консольном закреплении заготовки в патроне:

$$y_{\text{заг max}} = P_y \cdot l^2 / (3 \cdot E \cdot I), \quad (2)$$

где:  $l$  – длина заготовки (мм);  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга) (МПа). Для стали  $E = 0,21$  (МПа);  $I$  – момент инерции поперечного сечения заготовки (мм<sup>4</sup>). Для круглой заготовки  $I = \pi \cdot d^4 / 64$  (мм<sup>4</sup>).

При закреплении заготовки в центрах наибольшее отжатие происходит посередине заготовки

$$y_{\text{заг max}} = P_y \cdot l^3 / (48 \cdot E \cdot I). \quad (3)$$

При обработке заготовки диаметром 50-70 мм и длиной 100-200 мм обычно принимается  $J_{\text{заг}} \approx J_{\text{спи}} \approx 10\,000$  (Н/мм) [3].

С помощью динамометра определяется изменение радиальной составляющей  $\Delta P_y$  силы резания при изменении длины фаски на величину  $\Delta h_f$  в процессе износа и рассчитывается изменение диаметра заготовки  $\Delta d_{\text{упр}}$  по уравнению (1).

На начальном этапе износа ( $h_f = 0-0,3$  мм) радиальная составляющая силы резания  $P_y$  изменяется незначительно (примерно на 150 Н, или на 21 %). Можно рассчитать изменение диаметра от упругой деформации:

$$\Delta d_{\text{упр}} = 2 \cdot \Delta P_y / (J_{\text{заг}} + J_{\text{спи}}) = 2 \cdot 150 / (10000 + 10000) = 0,015 \text{ мм.}$$

Размерный износ в радиальном направлении относительно заготовки при заднем угле при вершине  $\alpha_{\text{в}} = 12^\circ$  и длине фаски износа при вершине  $h_{\text{фв}}$  рассчитывается по уравнению:  $h_{\text{раз}} = h_{\text{фв}} \cdot \text{tg} \alpha_{\text{в}} = 0,3 \cdot 0,213 = 0,064$  мм (рис. 3). Изменение диаметра заготовки от размерного износа  $\Delta d_{\text{разм}} = 2 \cdot h_{\text{раз}} = 2 \cdot 0,064 = 0,128$  мм.

Общее изменение диаметра от упругой деформации заготовки и размерного износа  $\Delta d_{\text{общ}} = \Delta d_{\text{упр}} + \Delta d_{\text{разм}} = 0,015 + 0,128 = 0,143$  мм, что соответствует приблизительно допуску 11 качества для диаметра 50 мм.

При увеличении длины фаски  $h_f$  с 0,6 до 0,9 мм (также на 0,3 мм) изменение радиальной составляющей силы резания более существенно за счёт более интенсивного увеличения сил резания – на 750 Н, что ещё больше увеличит погрешность обработки за счёт упругой деформации, хотя размерная составляющая останется той же.

Увеличение сил резания приводит к увеличению вероятности выкрашивания и даже к сколу режущей части инструмента. В первом случае отделяются небольшие объёмы (0,05...0,5 мм) инструментального материала, что происходит обычно на главной режущей кромке.

При использовании СМП чаще всего используются негативные пластины, у которых задний угол создаётся за счёт наклонной поверхности опорной пластины державки против часовой стрелки на требуемый угол  $\alpha$  (рис. 3). В этом случае передний угол  $\gamma$  будет по абсолютному значению равен  $\alpha$ , но с отрицательным знаком ( $\gamma = -\alpha$ ).

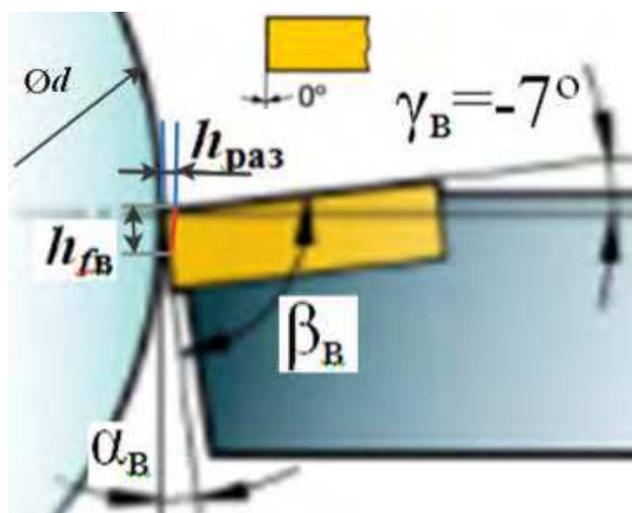


Рис. 3. Негативная СМП и размерный износ  $h_{раз}$

Использование программы ANSYS для расчёта напряжений в СМП методом конечных элементов показало, что при длине фаски износа  $h_f = 0,7$  мм контактные напряжения на ней существенно увеличиваются при отдалении от режущей кромки более 0,5 мм. Это вызывает рост эквивалентных напряжений в режущем клине СМП до 3625 МПа (рис. 4), что увеличивает вероятность разрушения режущей пластины [4, 5].

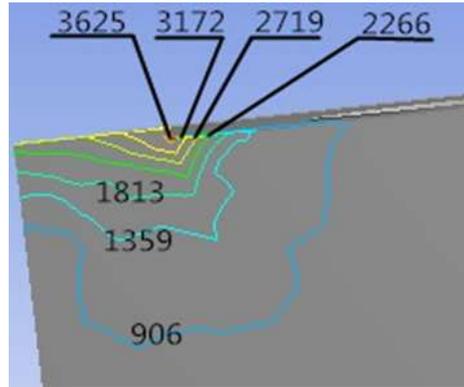


Рис. 4. Распределение внутренних эквивалентных напряжений в режущем клине. Сталь 40Х–Т15К6,  $\gamma = -7^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $h_f = 0,7$  мм,  $t = 2$  мм,  $v = 150$  м/мин.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников Д. В., Гречишников В. Л., Кирсанов С. В., Кокарев В. И., Схиртладзе А. Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под редакцией С. В. Кирсанова. - 2-е изд. доп. М.: Машиностроение, 2005. - 528 с: ил.
2. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
3. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
4. Kozlov V., Zhang J., Go I. Contact loads on surfaces of worn out cutter in steel machining // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 16-18 мая 2018 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск : Изд-во ТПУ, 2018. – [С. 39-45];
5. Козлов В.Н., Таха М.Х.М., Сабават С.К. Влияние вида стружки на распределение контактных напряжений на фаске задней поверхности режущего инструмента // VI Всероссийский фестиваль науки. XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование» (г. Томск, 18–22 апреля 2016 г.): В 5 т. Т. V. Ч. 1: Профессиональное образование в области технологии, дизайна, безопасности жизнедеятельности, транспорта и сервиса / ФГБОУ ВО «Томский государственный педагогический университет». – Томск: Изд-во Том. гос. пед. ун-та, 2016. – с. 91-97.