РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФАСКЕ ИЗНОСА РЕЗЦА ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

Козлов В.Н.¹, Бабаев А.С.², Семёнов А.Р.³ ¹НИ ТПУ, ИШНПТ, доцент ОМШ, e-mail: kozlov-viktor@bk.ru; ²Томский государственный университет, старший научный сотрудник, e-mail: a.s.babaev@mail.tsu.ru; ³Томский государственный университет, аспирант, e-mail: artems2102@yandex.ru

При обработке стали происходит износ режущих инструментов, что приводит к появлению округления режущей кромки радиусом ρ , лунки на передней поверхности шириной b_{π} и глубиной h_{π} , а также фаски на задней поверхности длиной $h_{3\pi}$ (рис. 1). Наиболее опасным является износ по задней поверхности, т. к. при этом существенно увеличиваются составляющие силы резания P_{yh} , P_{xh} и P_{zh} на этой фаске, что приводит к выкрашиванию и даже сколу режущей пластины. При черновой обработке важно определить наибольшую допустимую длину фаски износа по задней поверхности $h_{3\pi}$, чтобы не допустить скола режущей пластины.



Рис. 1. Направление составляющих **P**_{y h}, **P**_{x h} и **P**_{z h} силы резания на фаске износа по задней поверхности

Рис. 2. Направление технологических составляющих P_y , P_x и P_z силы резания

Многочисленные ранние исследования [1–13] показали, что силы на задней поверхности режущего инструмента появляются в результате действия нескольких явлений (факторов): 1) упругого восстановления материала заготовки после прохождения режущей кромки, сжатого в процессе действия составляющей P_{xy} результирующей силы резания на передней поверхности R_{n} ; 2) подмятия (вдавливания) под заднюю поверхность части срезаемого слоя из-за наличия округления режущей кромки радиусом ρ .

При свободном прямоугольном резании, например, при строгании, при отсутствии фаски износа на задней поверхности на передней поверхности будут действовать радиальная составляющая P_{yn} и тангенциальная составляющая P_{zn} от передней поверхности резца на образующуюся стружку и область стружкообразования (рис. 3, *a*) [5].

Действие сосредоточенной силы P_{yn} необходимо заменить на напряжения, действующие на проекцию условной плоскости сдвига на плоскость резания длиной 2*l*. Характер распределения этих напряжений достаточно сложен, поэтому для упрощения примем, что в этой области действуют равномерно распределённые нормальные напряжения (рис. 3, δ) величиной $q = P_{yn}/(2l\cdot b)$, где $2l = a \cdot ctg\Phi$; b - ширина пластины с учётом малой величины уширения зоны стружкообразования; $\Phi -$ угол наклона условной плоскости сдвига (°). В первом приближении этот угол можно рассчитать по уравнению $\Phi = cos\gamma/(k_a \cdot sin\gamma)$. $k_a -$ это коэффициент утолщения стружки (chip ratio), который рассчитывается по формуле $k_a = a_1/a$, где $a_1 -$ толщина стружки; a - толщина среза. При косоугольном резании с подачей s (мм/об) $a = s \cdot sin\phi$, где $\phi -$ главный угол в плане.



Рис. 3. Строгание пластины резцом (свободное прямоугольное резание) (a) и прогиб поверхности резания **mn_i**j, упруго восстанавливающейся при воздействии на неё силой **P**_{yn} в области стружкообразования (б)

Экспериментальное исследование распределения контактных напряжений может быть выполнено несколькими способами: 1) поляризационно-оптическим методом [6, 12]; 2) методом разрезного резца [4, 5, 7, 9, 10] (рис. 4); 3) методом лазерной интерферометрии [8].

Более достоверные результаты могут быть получены при использовании метода разрезного резца. В наших экспериментах был использован специальный четырёхкомпонентный динамометр В.А. Красильникова [4], который был спроектирован специально для этой цели (рис. 4). Конструкция этого динамометра позволяет использовать разрезные резцы большой ширины – 120 мм, что позволяет увеличить количество секций по ширине резца и, тем самым, уменьшить дискретность (разницу от режущей кромки до поверхности раздела пластин А и В), что приводит к увеличению точности измерения.



Рис. 4. Исследование распределения контактных напряжений на передней поверхности методом разрезного резца

В наших исследованиях распределения контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности выполнялось с использованием разрезного резца [4, 5, 7] при точении ступенчатого диска с поперечной (радиальной) подачей широкого резца, т. е. с направлением подачи, перпендикулярной режущей кромки. Таким образом, реализовывалось прямоугольное свободное резание.

Достаточно большая ширина диска 4 мм в контакте с единственной режущей кромкой обеспечивала небольшое уширение в области стружкообразования, но даже незначительно выдавливаемый слой металла по краям диска удалился двумя дополнительными боковыми резцами, не связанными с резцом и динамометром, которые обеспечивали калибровку ширины зоны контакта b = 4 мм.

К тому же динамометр имеет два пояса упругих измерительных элементов 1 и 2, и наличие нижнего пояса 2 позволяет контролировать постоянство общих составляющих P_z и P_y силы резания в серии экспериментов.

Пластины разрезного резца состоят из нескольких секций (от 18 до 20 штук в зависимости от ширины обрабатываемого диска b_{A}) (рис. 5), на каждой из которых предусмотрено разное расстояние x_{Ai} (мм) от режущей кромки до поверхности раздела пластин A и B, но при этом в любом случае выполняется равенство: $x_{Ai} + x_{Bi} = c$ (мм), где c – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента при его рассматриваемой геометрии и режиме резания.



Рис. 5. Секции разрезного резца

Приращение сил P_y и P_z на рассматриваемом *i*-том участке пластины *B* по сравнению с этими силами на предыдущем (*i*-1) участке рассчитываются по уравнениям:

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y}} \boldsymbol{B} \boldsymbol{i} = \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y}} \boldsymbol{B} \boldsymbol{i} - \Delta \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y}} \boldsymbol{B} \boldsymbol{i} - \mathbf{1} (\mathbf{H}); \tag{1}$$

$$\Delta \boldsymbol{P}_{z B i} = \boldsymbol{P}_{z B i} - \Delta \boldsymbol{P}_{z B i-1} (\mathrm{H}).$$
⁽²⁾

Нормальная N_i и касательная F_i силы, действующие на *i*-том участке, рассчитываются по уравнениям (3) и (4) в соответствие с уравнениями (1) и (2):

$$N_i = \Delta P_{zBi} \times \cos \gamma - \Delta P_{yBi} \times \sin \gamma; \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{F}_{i} = \Delta \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{B}\boldsymbol{i}} \times \cos \gamma + \Delta \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{z}\,\boldsymbol{B}\,\boldsymbol{I}} \times \sin \gamma. \tag{4}$$

Удельные нормальные q_{Ni} и касательные q_{Fi} контактные нагрузки (силы) на *i*-том участке пластины *B* рассчитывается как отношение **приращения сил** на этом участке к **приращению площади** ΔS_i контакта стружки на этом *i*-том участке:

$$\boldsymbol{q}_{Ni} = \Delta N_i / \Delta \boldsymbol{S}_i = (N_i - N_{i-1}) / (\Delta \boldsymbol{x}_i \times \boldsymbol{b});$$
(5)

$$\boldsymbol{q}_{Fi} = \Delta \boldsymbol{F}_i / \Delta \boldsymbol{S}_i = (\boldsymbol{F}_i - \boldsymbol{F}_{i-1}) / (\Delta \boldsymbol{x}_i \times \boldsymbol{b}). \tag{6}$$

При $\Delta x_i \rightarrow 0$ мм удельные нормальные q_{Ni} и касательные q_{Fi} контактные нагрузки на *i*-том участке пластины **B** будут приближаться к нормальным σ и касательным τ контактным напряжениям на этом участке: $q_{Ni} \approx \sigma_i$ (МПа), $q_{Fi} \approx \tau_i$ (МПа).

Выполнение исследований распределения контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при вышеуказанной схеме работы динамометра невозможно из-за появления уступа между пластинами A и B, который появляется вследствие большей упругой деформации измерительных упругих элементов I по сравнению с упругой деформации измерительных элементов 2 (см. рис. 4). Появившийся уступ начинает срезать дополнительную стружку с поверхности резания, которая забивает зазор S между пластинами A и B и нарушает работу динамометра, а иногда и приводит к разрушению кромок пластин.

Нами было предложено изменить схему работы динамометра: установить его на столе горизонтально-фрезерного станка и осуществлять подачу вертикально вверх (рис. 6). На валоправке фрезерного станка закрепляется диск из обрабатываемого материала с большим диаметром 160–200 мм, чтобы кривизна поверхности резания меньше влияла на взаимодействие по фаске задней поверхности. Режущая кромка в вертикальной плоскости совмещается с осью вращения шпинделя.

Величина минутной подачи $s_{\text{мин}}$ (мм/мин) рассчитывается из требуемой оборотной подачи: $s_{\text{мин}} = s$ (мм/об)·*n* (об/мин). В процессе эксперимента величина минутной подачи контролируется дополнительно.



Рис. 6. Исследование распределения контактных напряжений на фаске задней поверхности методом разрезного резца при предложенном расположении динамометра на столе горизонтально-фрезерного станка

Под действием радиальной составляющей P_{yn} силы резания на передней поверхности и силы P_{yAhi} , действующей на пластине A на части фаски задней поверхности длиной h_{Ai} , упругие элементы 2 упругодеформируются и пластина A с частью фаски задней поверхности длиной h_{Ai} опускается немного вниз (рис. 6). А так как упругие элементы 1 находятся на упругих элементах 2, то они тоже опускаются на ту же величину, поэтому уступа между пластинами A и B не образуется. Аналогичные упругие перемещения происходят в направлении оси OZ, которая располагается горизонтально при описанной схеме установки динамометра.

После этого рассчитываются изменения сил P_{yBhi} и P_{zBhi} при изменении длины части фаски задней поверхности пластины *B* на величину $\Delta h_{Bi} = h_{Bi} - h_{Bi-1}$ (мм), где h_{Bi} длина фаски задней поверхности при рассматриваемом измерении (*i*-е измерение), а h_{Bi-1} – длина фаски задней поверхности при предыдущим (*i*-1) измерении.

Так как задний угол на искусственной фаске износа по задней поверхности равен нулю $(a_h = 0^{\circ})$, то изменение сил в направлении оси **OZ** есть сила трения F_{hi} на рассматриваемом участке, изменение сил в направлении оси **OY** есть нормальная сила (сила давления) N_{hi} на рассматриваемом участке:

$$\Delta \boldsymbol{P}_{z\ hi} = \boldsymbol{P}_{zB\ hi} - \boldsymbol{P}_{zB\ hi-1} = \boldsymbol{F}_{hi}; \tag{7}$$

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{h}\boldsymbol{i}} = \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{B}\,\boldsymbol{h}\boldsymbol{i}} - \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{B}\,\boldsymbol{h}\boldsymbol{i}} \cdot 1 = N_{\boldsymbol{h}\boldsymbol{i}};\tag{8}$$

Толщина среза при прямоугольном свободном резании равна радиальной подаче s (мм/об), но с единицей измерения мм: a = s (мм).

Отношение приращения силы к приращению площади контакта фаски задней поверхности есть удельная нормальная $q_{Nh\,i}$ и $q_{Fh\,i}$ касательная контактные нагрузки. При малом изменении длины контакта фаски на задней поверхности пластины **B** (если $\Delta h_i \rightarrow 0$ мм) можно говорить о нормальном $\sigma_{h\,i}$ и касательном $\tau_{h\,i}$ контактном напряжениях на рассматриваемом участке фаски задней поверхности:

 $q_{Nh\,i} = \Delta P_{yh\,i} / (b \cdot \Delta h_i) \approx \sigma_{h\,i} (M\Pi a); \quad q_{Fh\,i} = \Delta P_{zh\,i} / (b \cdot \Delta h_i) \approx \tau_{h\,i} (M\Pi a).$

Исследование финансировалось Российским научным фондом, проект № 23-79-10166.

Список литературы

1. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М.Ф. Полетика – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.

2. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.

3. Hu, J., Chou, Y.K. Characterizations of cutting tool flank wear-land contact. Wear **2007**, 263(7–12), 1454–1458.

4. Полетика М.Ф., Красильников В.А. Динамометр для измерения силы и напряжений на передней поверхности резца // Станки и инструменты. – 1971. – Т. 2. – С. 37–38.

5. Poletika M.F., Kozlov V.N. Forces and Deformations at the Tool Flank-In: «Enhancing the Pulling Efficiency», Riga Polytechn. Inst., Riga, Latvia, 1988. – Vol. 1. – P. 134–141 (in Russ.).

6. Полетика М.Ф., Утешев М.Х. Исследование процесса резания поляризационнооптическим методом. – Известия Томского политехнического института. 1964. – Т. 114. – С. 21–32.

7. Kozlov V., Zhang J.Y., Cui J., Bogolyubova M. Split Cutter Method for Contact Stresses Research over Flank Surface of a Cutter. Key Engineering Materials. – 2017. – 743. – P. 258–263.

8. Филиппов А.В., Проскоков А.В. Исследование процесса стружкообразования при резании металлов методом цифровой корреляционной спекл-интерферометрии. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2014. – № 2. – С. 100–113.

9. Физические основы процесса резания металлов. Остафьев В.А., Стабин И.П., Румбешта В.А. и др. – Киев, Вища школа, 1976. – 136 с.

10. Усачёв П.А., Пархоменко В.П. Повышение износостойкости и прочности режущих инструментов. – Киев, Техника, 1981. – 160 с.

11. Proskokov, A.V., Petrushin, S.I. Flank contact load distribution at cutting tool wear. 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – IEEE 2012, 2, 173–177.

12. Poletika M.F., Melikhov V.V. Contact Loads at the Tool Flank-Vestnik Mashinostroyenia, 1967. – No. 9 – P. 31–33 (in Russ.).

13. Hu, J., Chou, Y.K. Characterizations of cutting tool flank wear-land contact. *Wear* 2007, 263 (7–12), 1454–1458.