

2018 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – [С. 39-45].

4. Artamonov E. V., Chernyshov M. O., Pomigalova T. E. Improving the Performance of Composite Bits with Replaceable Inserts // Russian Engineering Research, 2017, Vol. 37, No. 4, pp. 348-350.

Чжан Цинжун (Китай), Шэ Лу (Китай), Го Таоюй (Китай),  
Козлов Виктор Николаевич (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск

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

## РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ В НАЧАЛЕ РЕЗАНИЯ

Многие режущие инструменты начинают резание с врезанием в заготовку сразу по всей длине режущей кромки, например при врезании в коническую поверхность, оставшуюся от предыдущей обработки (рис. 1 а), или при фрезеровании торцовыми фрезами.

Это приводит к резкому увеличению нагрузки на него, что усугубляется наличием фаски износа по задней поверхности длиной  $h_3$  (рис. 1 б).



Рис. 1. Контакт главной режущей кромки с заготовкой по всей её длине в начале резания (а) и фаска износа по задней поверхности длиной  $h_3$  и с задним углом на ней  $\alpha_\phi = 0 \dots -3^\circ$  (б)

Поэтому инструмент часто ломается или выкрашивается на режущей кромке ещё до начала образования стружки. Для расчёта инструмента на прочность в этот период необходимо знать распределение контактных напряжений на его рабочих поверхностях [1-4].

Для изучения динамики изменения сил резания в период врезания использовался токарный резец с главным углом в плане  $\phi=45^\circ$ ,

главным передним углом  $\gamma=0^\circ$ , главным задним углом  $\alpha=12^\circ$ , вспомогательным углом в плане  $\varphi_1=45^\circ$ , углом наклона главной режущей кромки  $\lambda=0^\circ$ , радиусом при вершине  $r=0,02$  мм при продольной подаче  $s$  (мм/об) (рис. 1 а).

На задней поверхности затачивалась искусственная фаска различной длиной  $h_3$  с постоянным задним углом  $\alpha_h=0^\circ$ , имитирующая износ по задней поверхности. Радиус округления режущей кромки был равен минимально возможным при заточке на остро ( $\rho=0,003$  мм).

Врезание происходило в заготовку из стали 40Х, имеющую коническую поверхность, оставшуюся после отключения подачи в предыдущем эксперименте (предыдущая поверхность резания) с углом в плане  $\varphi=45^\circ$ , что обеспечивало контакт резца сразу по всей длине режущей кромки в начальный момент её касания. Исследования выполнялись с постоянной скоростью резания  $v = 120$  м/мин, обеспечивающей отсутствие нароста на передней поверхности, и различными подачей  $s = 0,07-0,52$  мм/об и глубиной резания  $t = 1-4$  мм.

Измерения составляющих сил резания выполнялись с помощью токарного динамометра Kistler. При точении измерялась средняя температура резания с помощью инфракрасного термометра MS-5630 ( $t$  °С) и контролировалась термо-ЭДС ( $\mu$ А) с помощью естественной термопары.

Исследование распределения контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности выполнялось **методом переменной длины фаски** износа  $h_3$  с задним углом на ней  $\alpha_h = 0^\circ$ . Достоверность определялась сравнением величины нормальной  $N_{h\text{эп}}$  и касательной  $F_{h\text{эп}}$  сил (Н) на фаске задней поверхности, рассчитанных по полученным эпюрам контактных напряжения, с величиной этих сил, полученных при измерении  $N_{h\text{эксп}}$  и  $F_{h\text{эксп}}$  сил (Н) при различной длине фаски  $h_3$ .

Наши исследования показали, что при врезании в стальную заготовку происходит резкое увеличение почти в 2 раза составляющих сил резания по сравнению с установившемся резанием (рис. 2). После появления стружки на передней поверхности происходит быстрое уменьшение сил резания. Такие же процессы происходят при встречном фрезеровании, когда в начальный момент врезания зуба фрезы толщина среза  $a$  (мм) равна нулю.

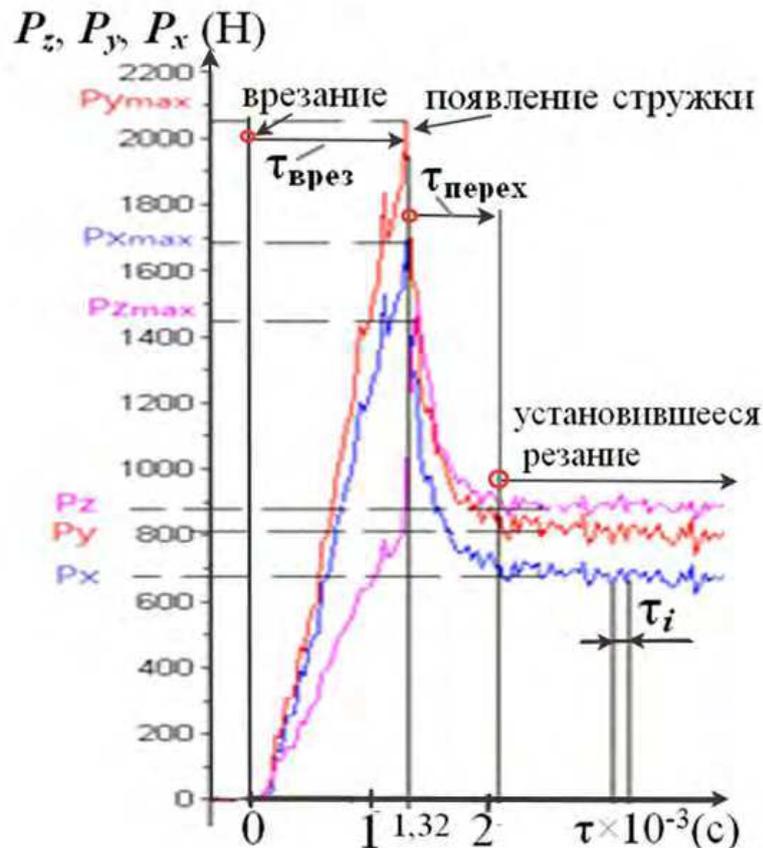


Рис. 2. Изменение составляющих силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  (Н) при врезании. Сталь 40Х – Т15К6.  $s = 0,07$  мм/об,  $v = 120$  м/мин,  $t = 1,8$  мм. Ордината – составляющие силы резания (Н); абсцисса – время от момента касания конической поверхности заготовки  $\tau$  (с)

Удельная нормальная контактная нагрузка на фаске задней поверхности  $q_{Nh}$  (МПа) (нормальное контактное напряжение  $\sigma_h$  (МПа) при  $\Delta h_3 \rightarrow 0$  мм) на фаске рассчитывалось как отношение приращения нормальной силы на фаске задней поверхности  $\Delta N_h = \Delta P_{xy}$  (Н) к приращению площади фаски задней поверхности  $q_{Nh} = \Delta N_h / (\Delta h_3 \cdot b)$ , где  $\Delta h_3$  – приращение длины фаски (мм),  $b$  – ширина контакта фаски резца с поверхностью заготовки и рассчитывается по известной формуле  $b = t / \sin \varphi$  (мм).

На гистограммах удельных нормальных  $q_{Nh}$  и касательных  $q_{Fh}$  контактных нагрузок у режущей кромки нет участка с большой величиной контактной нагрузки (рис. 3).

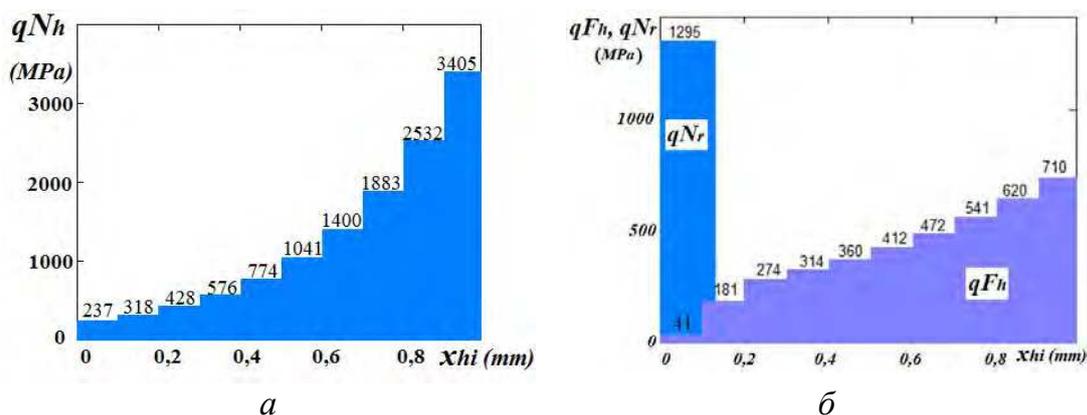


Рис. 3. Распределение нормальных  $q_{Nh}$  (а) и касательных  $q_{Fh}$  (б) контактных нагрузок (МПа) на фаске задней поверхности и величина удельных нормальных контактных нагрузок на передней поверхности  $q_{Nr}$  (МПа) (б) рядом с режущей кромкой при **врезании**. Сталь 40Х – Т15К6.  $s = 0,07$  мм/об,  $v = 120$  м/мин,  $t = 1,8$  мм Абсцисса – расстояние от режущей кромки вдоль фаски износа по задней поверхности  $x_{hi}$  (мм)

При врезании рядом с режущей кромкой на небольшом участке передней поверхности длиной  $s_{вр}$  действуют большие удельные контактные нагрузки  $q_{Nr}$  (контактные напряжения  $\sigma_{вр}$ ), направленные перпендикулярно передней поверхности (рис. 4). Сила трения на указанном участке мала, т.к. на этом участке в момент формирования стружки нет движения стружки вдоль передней поверхности, поэтому  $q_{Fr} = 0$  МПа.

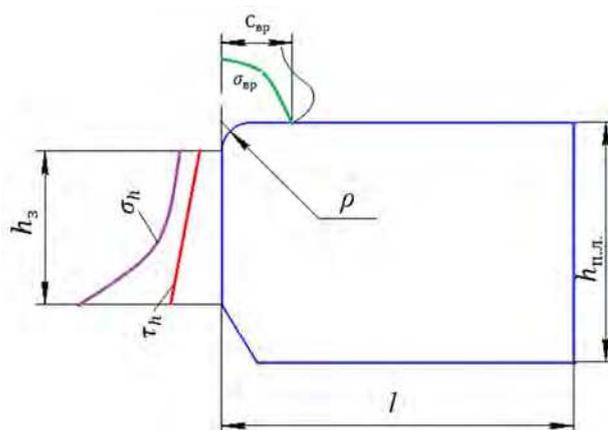


Рис. 4. Модель режущего клина и его нагружение контактными напряжениями при врезании при обработке стали

Исследования, выполненные по результатам наших экспериментов и расчётам, показали, что при наибольшей силе  $P_z$  (рис. 2) длина контакта передней поверхности с заготовкой при врезании

$c_{вр} \approx \rho + 0,1 \cdot a_{вр}$ , где  $a_{вр}$  – толщина среза при врезании (мм), т.е. толщина слоя металла заготовки в зоне стружкообразования, уходящего под заднюю поверхность инструмента. На гистограммах указана  $c_{вр} \approx 0,1$  мм.

Наши эксперименты показывают, что на этом участке передней поверхности практически отсутствует касательная сила, поэтому при расчёте методом конечных элементов участок  $c_{вр}$  нагружаем только нормальной к передней поверхности удельной контактной нагрузкой  $q_{N,r} = N_{вр} / (c_{вр} \cdot b)$ , где  $N_{вр}$  – нормальная к передней поверхности сила на участке длиной  $c_{вр}$ ;  $b$  – длина контакта режущей кромки с поверхностью резания при врезании ( $b = t / \sin \varphi$ ). При переднем угле  $\gamma = 0^\circ$  и угле наклона главной режущей кромки  $\lambda = 0^\circ$   $N_{вр} = P_{z \text{ п вр}}$ .

По нашему мнению при врезании на радиусном участке режущей кромки появляется **застойная зона**, под силовым действием которой происходит прогиб поверхности резания. Восстанавливающаяся поверхность этого прогиба давит на поверхность фаски задней поверхности и вызывает появление на ней контактных напряжений. Чем дальше от режущей кромки, тем больше будет величина этого восстановления, тем больше будут контактные напряжения (удельные контактные нагрузки), что и наблюдается на рис. 3.

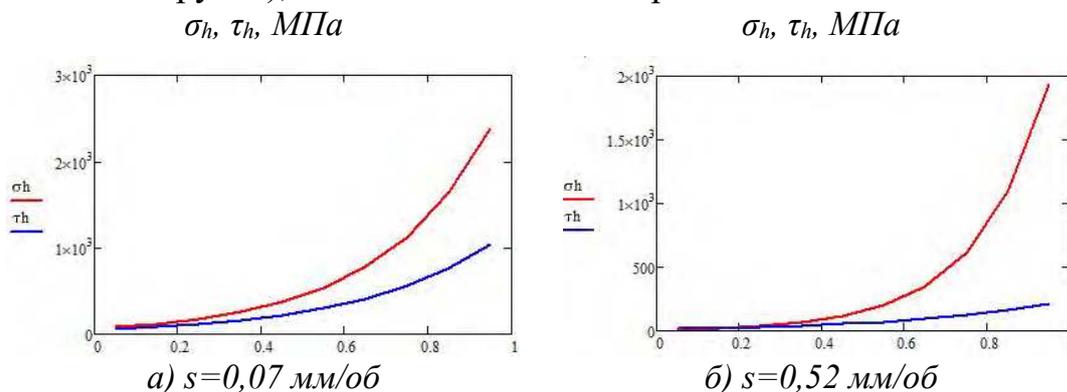
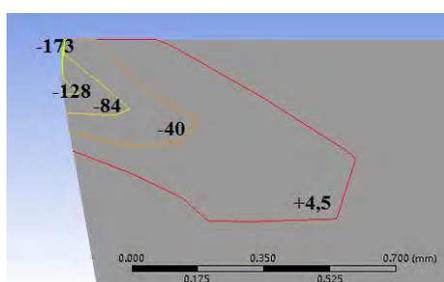


Рис. 5. Распределение контактных напряжений на фаске задней поверхности (МПа) при врезании при учёте силового взаимодействия реза и заготовки на радиусном участке режущей кромки. Сталь 40Х - Т15К6,  $t = 2$  мм,  $v = 120$  м/мин. Ордината – нормальные  $\sigma_h$  и касательные  $\tau_h$  контактные напряжения (МПа) на фаске задней поверхности; абсцисса – расстояние от режущей кромки вдоль фаски износа по задней поверхности  $x_{hi}$  (мм)

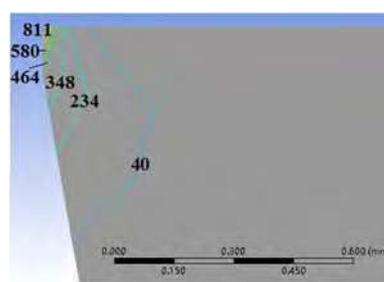
Эпюры контактных напряжений на фаске задней поверхности, представленные на рис. 5, объясняют повышенный износ при обработке с малыми подачами и увеличение вероятности поломки режущего инструмента при увеличении длины фаски износа по задней по-

верхности более 0,8 мм. При подаче  $s=0,07$  мм/об контактные напряжения у режущей кромки больше, чем при большей подаче  $s=0,52$  мм/об.

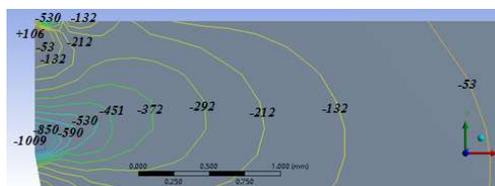
Расчёт напряжений в режущем клине резца методом конечных элементов с использованием программы ANSYS показал, что при малых подачах ( $s = 0,07$  мм/об) и длинах фаски задней поверхности ( $h_3 = 0,13$  мм) в режущем клине при врезании возникают напряжения сжатия ( $\sigma_x = -173$  МПа, ось OX направлена перпендикулярно к фаске и от неё, т.е. вправо) (рис. 6 а). При этом наибольшие эквивалентные напряжения ( $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 811$  МПа) (рис. 6 б) в 5 раз меньше предельно допустимых.



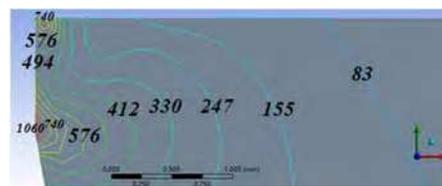
а)  $\sigma_x$  (МПа),  $h_3 = 0,13$  мм,  
 $s = 0,07$  мм/об



б)  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  (МПа),  $h_3 = 0,13$  мм,  
 $s = 0,07$  мм/об



в)  $\sigma_x$  (МПа),  $h_3 = 0,95$  мм,  
 $s = 0,11$  мм/об



з)  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  (МПа),  $h_3 = 0,95$  мм,  
 $s = 0,11$  мм/об

Рис. 6. Распределение нормальных  $\sigma_x$  и эквивалентных  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  напряжений (МПа) в режущем клине резца при врезании. Сталь 40Х-Т15К6;  
 $t = 2$  мм;  $v = 2$  м/с;  $\rho = 3$  мкм

При большом допускаемом износе  $h_3=0,95$  мм была определена оптимальная подача  $s = 0,34$  мм/об с точки зрения прочности режущего клина.

### Выводы

При образовании сливной стружки с увеличением подачи наибольшие контактные напряжения удаляются от режущей кромки,

что приводит к уменьшению интенсивности износа по задней поверхности;

Во время обработки стали при врезании даже с небольшой подачей ( $s=0,23$  мм/об) на передней поверхности резца, не имеющего износа по задней поверхности, у режущей кромке возникают большие растягивающие напряжения ( $\sigma_x=3438$  МПа). Эквивалентные напряжения в этой области существенно больше ( $\sigma_{\text{экв}}=5174$  МПа), что увеличивает вероятность выкрашивания режущей кромки;

При врезании даже с небольшой подачей  $s=0,23$  мм/об на передней поверхности резца, имеющего небольшой износ по задней поверхности  $h_3=0,29$  мм, у режущей кромке растягивающие уменьшаются ( $\sigma_x=2079$  МПа). Эквивалентные напряжения в этой области также уменьшаются ( $\sigma_{\text{экв}}=4290$  МПа), что уменьшает вероятность выкрашивания режущей кромки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – 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. Kozlov V., Zhang J., Cui J., Bogolyubova M. Split Cutter Method for Contact Stresses Research over Flank Surface of a Cutter // Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. – 2017. v. 73, pp. 252-257.
4. Методика измерения контактных напряжений на поверхностях резца [Электронный ресурс] / В. Н. Козлов [и др.]; науч. рук. В. Н. Козлов // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 ноября 2016 г. в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики (ИК) ; под ред. В. С. Аврамчук [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. - Т. 2. - с. 350-352.
5. Hu, J., Chou, Y.K. Characterizations of cutting tool flank wear-land contact. Wear, V. 263, Iss. 7-12, SPEC. ISSS., 10 September 2007, P. 1454-1458.