

Увеличение заднего угла  $\alpha$  с 5 до 18° приводит к увеличению  $\sigma_{\text{экв max}}$  в 1,5 раза (рис. 9). Однако использование режущих инструментов задним углом менее 8 градусов приводит к более интенсивному увеличению фаски износа по задней поверхности, поэтому оптимальный задний угол при обработке титановых сплавов рекомендуется 8°.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
2. 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]. –Заглавие с титульного экрана. –Свободный доступ из сети Интернет.

Ян Анькан (Китай),

Хэ Лин (Китай),

Козлов Виктор Николаевич (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск

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

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Для изучения распределения контактных напряжений на передней поверхности резца применялось прямоугольное свободное точение периферии диска из титанового сплава BT3-1 резцом с радиальной подачей  $s$  (мм/об), т.е. толщина среза  $a = s$  (мм). При малом уширении стружки ширина контакта стружки с передней поверхностью  $b$  принималась равной ширине диска  $b_d$ , тем более, что даже при незначительном уширении стружки основная контактная нагрузка приходится на основную часть стружки [1, 2].

С использованием токарного динамометра измерялись технологические составляющие силы резания: тангенциальная составляющая  $P_z$  (Н), направленная касательно к поверхности резания, и радиальная составляющая  $P_y$  (Н), направленная в основной плоскости радиально относительно обрабатываемого диска. Главная режущая кромка резца устанавливалась по оси центров, поэтому вектор силы  $P_z$  совпадала по направлению с вектором скорости резания  $v$  [1].

После точения измерялась длина контакта стружки с передней поверхностью  $c$  (мм), однако из-за сегментного характера стружки, близкого к элементному, длина контакта очень мала и неустойчива, плохо видима, поэтому при её измерении возникают достаточно большие погрешности.

По измеренным составляющим силам при резании острым резцом, т.е. практически неизношенным по задней поверхности, были построены графики влияния толщины среза на составляющие  $P_z$  и  $P_y$  (рис. 1).

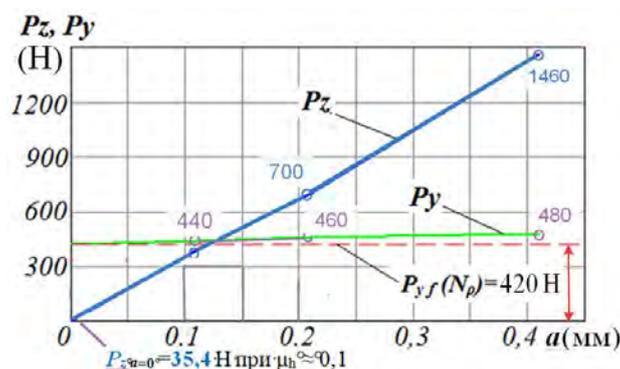


Рис. 1. Влияние толщины среза  $a$  (мм) при прямоугольном свободном точении диска на силы на передней поверхности острого резца при обработке титанового сплава. ВТЗ-1 – ВК8,  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $v = 60$  м/мин,  $b = 2,3$  мм.

Методом экстраполяции на нулевую толщину среза ( $a = 0$  мм) были выделены силы, действующие на передней и на задней поверхности.

График  $P_y = f(a)$  показывает, что на режущей кромке с очень маленьким радиусом округления  $\rho$  и очень маленькой фаской износа по задней поверхности длиной  $h_f = 0,053$  мм действует большая суммарная сила на округлённом участке и фаске задней поверхности  $P_{yf}$ :  $P_{yf} = P_{y \text{ flank}} + P_{y \rho} = 420$  Н = const.

Разница величины силы  $P_y = f(a)$  и этой силой на режущей кромке  $P_{yf} = 420$  Н есть сила на передней поверхности  $P_{yn}$ :  $P_{yn} = P_y - P_{yf}$ . При переднем угле  $\gamma = 0^\circ$  касательная сила на передней поверхности  $F = P_{yn}$ .

График  $P_z = f(a)$  показывает, что на режущей кромке отсутствуют существенная сила ( $P_{zf} \approx 0$  Н). Поэтому сила  $P_z = f(a)$  есть тангенциальная составляющая силы резания на передней поверхности  $P_{zn} = f(a)$ . При переднем угле  $\gamma = 0^\circ$  нормальная сила на передней поверхности  $N = P_{zn}$ .

Из-за небольшой длины контакта стружки с передней поверхностью при обработке титанового сплава ВТЗ-1, большой величины нормальных контактных напряжений и температуры в зоне контакта при скорости резания  $v = 60$  м/мин, используемой в промышленности при обработке титанового сплава ВТЗ-1, возникают большие сложности при исследовании распределения контактных напряжений методом разрезного реза.

Для проверки достоверности полученных результатов может быть применён расчётный метод. При этом предполагаются три возможные формы эпюр, которые позволят рассчитать наибольшие контактные напряжения эпюр на передней поверхности (рис. 2).



Рис. 2. Возможные формы эпюры нормальных контактных напряжений  $\sigma$  на передней поверхности реза. ВТЗ-1 – ВК6, толщина среза  $a = 0,11$  мм, скорость резания  $v = 60$  м/мин, передний угол  $\gamma = 0^\circ$

Промежуточные формы также возможны, но они существенно не изменяют, по сравнению с указанными тремя формами, нагружение режущего клина при расчёте его напряжённо-деформированное состояние (НДС) методом конечных элементов (МКЭ).

Расчёт величины наибольших контактных напряжений позволит в какой-то мере оценить достоверность той или иной формы эпюры: если наибольшие контактные напряжения будут нереально большими или малыми, значит такая форма маловероятна. После принятия формы эпюр рассчитываются нормальная  $N_{эп}$  ( $N_\sigma$ ) и касательная  $F_{эп}$  ( $F_\tau$ ) силы на передней поверхности по принятой форме эпюры. Эти силы должны быть приблизительно равны физическим составляющим силам, полученным из эксперимента ( $N_{эксп}$  и  $F_{эксп}$ ). Исходя из этого проверочного расчёты и будут определяться наибольшие контактные напряжения.

На результаты расчётов влияет длина контакта стружки с передней поверхностью  $c$  (мм), однако из-за непостоянства её длины будут рассмотрены два крайних варианта: 1)  $c = 1,1 \times a$ ; 2)  $c = 3 \times a$  (рис. 3).



Рис. 3. Изменение длины контакта элемента стружки с передней поверхностью реза в процессе формирования элемента стружки

Конечно, в процессе образования элемента стружки происходит изменение величины контактных напряжений, этот процесс ещё недостаточно изучен.

В самом начале образования элемента стружки нагрузка на переднюю поверхность будет в основном на расстоянии не более  $0,5 a$ , (рис. 3), однако на перед отделением сформировавшегося элемента нагрузка будет наибольшая и будет соответствовать длине контакта  $c \approx 1,1 \cdot a$ . Поэтому это состояние будет рассматриваться как основное.

Для прочности режущей части наибольшую опасность представляют нормальные контактные напряжения  $\sigma$ , которые в несколько раз превышают касательные  $\tau$ , судя по физическим составляющим  $N$  и  $F$  силы резания.

В тех случаях, когда происходит образование не элементной стружки (рис. 3), а сегментной, длина контакта увеличивается до  $c \approx 3 \cdot a$ . Но, несмотря на возможное небольшое увеличение силы резания, основная нагрузка будет приходиться на участок  $l_1 \approx (1 \dots 1,1) \cdot a$ , что будет соответствовать нагружению при  $c \approx 1,1 \cdot a$ . На остальной части контакта

стружки нормальные контактные напряжения будут несущественными и не будут влиять на прочность режущей части.

Малая длина контакта стружки  $c$  связана с сегментным характером стружки со слабой связью элементов у прирезцовой поверхности, а иногда она близка к по характеру с элементной (рис. 3). Тонкий связующий прирезцовый слой образуется из-за высокой температуры поверхности контакта, близкой к температуре плавления титанового сплава ВТЗ-1, и большому давлению в зоне формирования стружки.

Однако на расстоянии от режущей кромки более толщины среза  $a$  ( $l_1 > a$ ) (рис. 3) давление на сформировавшийся и отделённый элемент со стороны заготовки в зоне формирования элемента уже практически не оказывается, и поэтому наиболее вероятна модель № 1 ( $c = 1,1 \times a$ ) с трапецеидальной формой эпюры нормальных контактных напряжений  $\sigma$ .

На расстоянии  $x < l_1 \approx a$  принимается, что распределение нормальных контактных напряжений практически равномерное из-за жёсткости подпора на формируемый элемент со стороны ещё не срезанного слоя заготовки, поэтому принимается  $\sigma_{II} \approx 0,93 \cdot \sigma_{\max}$ .

Поскольку касательная сила на передней поверхности при обработке титанового сплава ВТЗ-1 мала, то принимается, что эпюра касательных контактных напряжений  $\tau$  имеет равномерный характер во всех случаях. Это хорошо соотносится с гипотезой о состоянии прирезцовой поверхности стружки близком к вязкой жидкости из-за высокой температуры резания и сплавлением элементов стружки по тонкому прирезцовому слою.

Таблица 1

*Влияние толщины среза и длины контакта стружки на наибольшие контактные напряжения при **треугольном** характере эпюры  $\sigma$  (см. рис. 1, вариант №1) (ВТЗ-1-ВК8,  $\gamma = 0^\circ$ , образовании элементной стружки)*

	$a = 0,11$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,11$ мм, $c = 3a$	$a = 0,21$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,21$ мм, $c = 3a$	$a = 0,41$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,41$ мм, $c = 3a$
$\sigma_{\max}$ (МПа)	2810	1027,2	2634,6	966	2815	1032
$\tau_{\max}$ (МПа)	71,8	26,3	75,3	27,6	57,6	21,1
$\mu_{\min}$	0,0256	0,0256	0,0286	0,0286	0,0205	0,0204

Таблица 2

Влияние толщины среза и длины контакта стружки на наибольшие контактные напряжения при **трапецидальном** характере эпюры  $\sigma$  (см. рис. 1, вариант №2) (BT3-1-BK8,  $\gamma = 0^\circ$ , образовании элементной стружки)

	$a = 0,11$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,11$ мм, $c = 3a$	$a = 0,21$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,21$ мм, $c = 3a$	$a = 0,41$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,41$ мм, $c = 3a$
$\sigma_{\max}$ (МПа)	1390,7	813,1	1432,5	764	1530	817
$\tau_{\max}$ (МПа)	71,8	26,3	75,3	27,6	57,6	21,1
$\mu_{\min}$	0,0516	0,0324	0,0526	0,0361	0,0376	0,0258

Изменение заднего угла значительно увеличивает наибольшее значение эквивалентного напряжения. Так, при  $\gamma = 0^\circ$  происходит увеличение до 2935,9...4188,5 МПа при разной величины заднего угла  $\alpha$  (рис. 4).

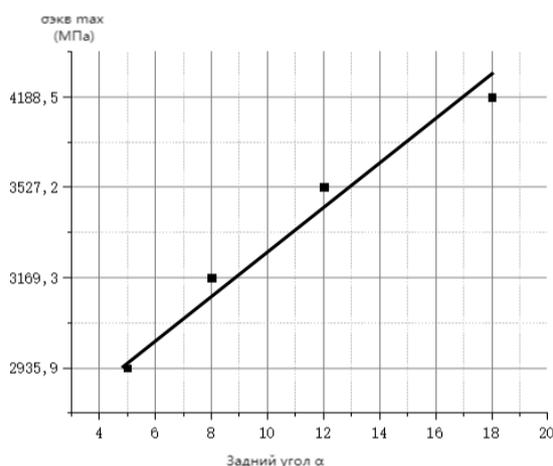


Рис. 4. Влияние величины заднего угла  $\alpha$  на наибольшие эквивалентные напряжения при обработке титанового сплава неизношенным резцом. BT3-1-BK8,  $v=120$  м/мин,  $\gamma=0^\circ$ ,  $b = 2,3$  мм,  $a = 0,41$  мм,  $c = 1,1 \times a$ , треугольный характер эпюры  $\sigma$ , длина контакта стружки разделена на 5 участков

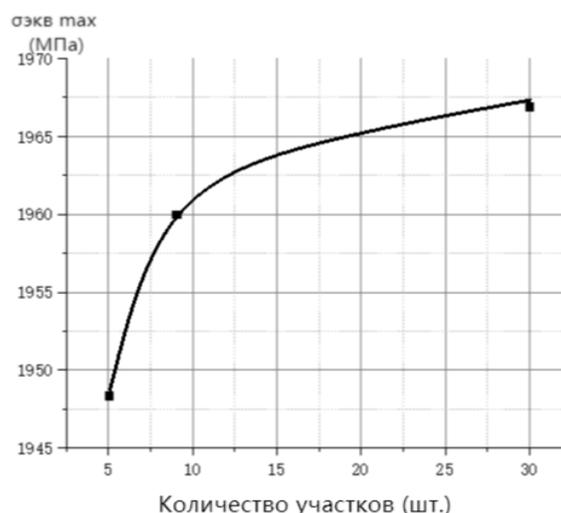


Рис. 5. Влияние количества участков, на которые делится длина контакта стружки с передней поверхностью, на наибольшее эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экв max}}$  при трапецидальном характере эпюры  $\sigma$  на передней поверхности при обработке титанового сплава неизношенным резцом. BT3-1-BK8,  $v=120$  м/мин,  $\gamma=0^\circ$ ,  $b = 2,3$  мм,  $a = 0,41$  мм,  $c = 1,1 \times a$ ,  $\alpha=8^\circ$

Несмотря на казалось бы существенное увеличение наибольшего эквивалентного напряжения на рис. 5, коэффициент увеличения  $\sigma_{\text{экв max}}$  при наибольшем количестве участков при  $a = 0,41$  мм практически равен единице:  $K_{\sigma_{\text{экв max}}} = \sigma_{\text{экв max при 30 уч}} / \sigma_{\text{экв max при 5 уч}} = 1966,9 / 1948,4 = 1,0095$ .

Таким образом, можно не увеличивать количество участков на длине контакта стружки с передней поверхности, что упрощает подготовку к внешнему нагружению. В рассматриваемых случаях достаточно даже 5 шт. при малой длине контакта  $c \leq 0,451$  мм. Но лучше использовать длину участка не более 0,1 мм ( $l_{\text{уч-ка опт}} = 0,05 \dots 0,1$  мм).

Исследование распределение контактных напряжений на задней поверхности резца показало, что при отсутствии фаски износа на задней поверхности силы задней поверхности очень малы: измерение технологических составляющих  $P_z$  и  $P_y$  силы резания при свободном прямоугольном точении периферии диска из титанового сплава ВТ3-1 резцом с разными задними углами  $\alpha$  от 5 до 18° не показало даже незначительных изменений в их величинах. В промышленности не используются режущие инструменты с главным задним углом менее 5°.

Для исследования распределение контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности резца затачивалась искусственная фаска с задним углом по фаске  $\alpha_f$  ( $\alpha_h$ ) равной нулю градусов, что соответствует экспериментально измеренной геометрии изношенного инструмента, если длина фаски  $h_f$  не превышает 1,4 мм [1, 2, 4].

Экспериментальные исследования при естественном износе не представляются возможными, т.к. износ протекает неравномерно, своё влияние будет оказывать и округление режущей кромки, которое неизбежно при обработке материалов и, особенно, титановых сплавов.

Исследования выполнялись двумя методами: методом разрезного резца [2, 4] и методом изменения длины искусственной фаски. Последний метод позволяет исследовать распределение контактных напряжений как на большом, так и на малом расстоянии от режущей кромки на фаске. Вблизи режущей кромки метод разрезного резца непригоден из-за выкрашивания режущих пластин.

При использовании метода переменной фаски принималось, что: 1) контактные напряжения на фаске не влияют на процессы на передней поверхности режущего инструмента [1-4]; 2) контактные напряжения на фаске и характер их распределения не зависят от величины фаски на задней поверхности при  $\alpha_h = 0^\circ$  [2, 4].

Исследования показали, что нормальные контактные напряжения на фаске задней поверхности имеют большую величину – до 3400 МПа в зависимости от толщины среза, но при отдалении от режущей кромки более 0,4 мм они быстро уменьшаются до 200 МПа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
2. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
3. 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.
4. Методика измерения контактных напряжений на поверхностях резца / 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.