

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЗЦА В ЗОНЕ ЗАКРУГЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Напряженно-деформированное состояние резца и зоны резания исследовалось неоднократно как экспериментальными, так и численными методами [1–3]. Однако еще не было уделено внимание ключевому месту в зоне резания — району вокруг закругления режущей кромки. Именно здесь происходит разделение обрабатываемого материала на потоки «в стружку» и «в деталь». В настоящей работе рассматривается преимущественно напряженное состояние резца в непосредственной близости к режущей кромке. Результаты получены с помощью моделирования методом конечных элементов (МКЭ).

Моделирование проводилось в упруго-пластической плоской постановке (плоская деформация, ортогональное резание). Резец имел передний угол  $\gamma=10^\circ$ , задний угол  $\alpha=30'$  (имитация площадки износа по задней поверхности), радиус закругления режущей кромки  $\rho=60$  мкм. Толщина срезаемого слоя составляла 200 мкм. Учитывалась стружка перед резцом (коэффициент усадки стружки  $K=2$ ).

Свойства материала резца были выбраны усредненными для всей группы твердых сплавов: изотропность, модуль упругости  $E_1=4 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu_1=0,2$ . Предполагалось чисто упругое поведение материала резца.

Обрабатываемый материал был принят упруго-пластическим со свойствами, усредненными для группы высокоуглеродистых и легированных сталей [4]: изотропные упругость и упрочнение, пластическое течение по критерию Губера-Мизеса, модуль упругости  $E_2=2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu_2=0,3$ , предел текучести  $\sigma_T=750$  МПа, касательный модуль упрочнения  $E_T=2 \cdot 10^3$  МПа.

Применявшиеся конечноэлементные сетки показаны на рис. 1 (представлен только район режущей кромки). Они сгущены вокруг закругления кромки.

Далее дугу закругления будем мысленно делить на трети (примерно по  $30^\circ$  в каждой): нижняя треть (примыкает к задней поверхности), средняя треть, верхняя треть (примыкает к передней поверхности инструмента).

Использованы четырехугольные 8-узельные элементы повышенной точности (квадратичная аппроксимация перемещений). На рис. 1 слева вверху находится сетка инструмента, справа внизу — сетка детали. Инструмент получает

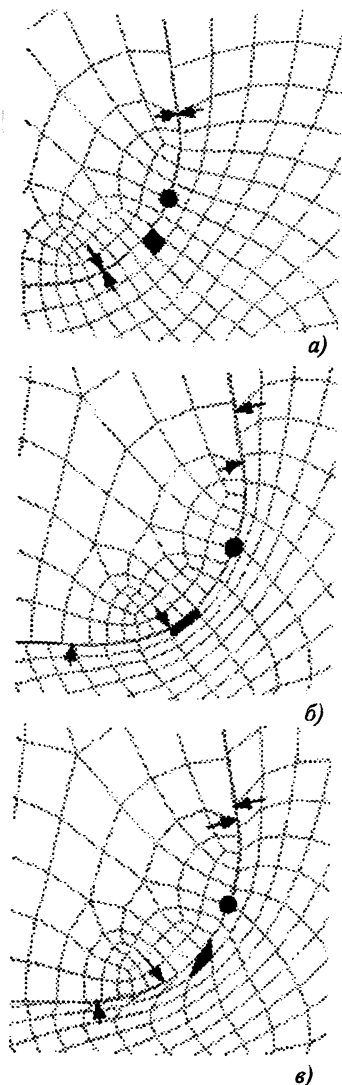


Рис. 1. Сетки конечных элементов реза и детали до врезания (а) и после врезания на 50 мкм для коэффициента трения  $\mu=0$  (б) и  $\mu=0,5$  (в)

перемещение  $U$  слева направо. На контакте инструмента и детали размещены линии специальные контактные элементы. Они допускают проскальзывание сеток и размыкание-замыкание контакта. Интерференция сеток (взаимопроникновение) автоматически предупреждается путем роста контактного давления.

Контактные элементы передают также касательные напряжения (сила трения) между сетками реза и детали. Были смоделированы два противоположных случая — свободное скольжение (коэффициент трения  $\mu=0$ ; обеспечен идеальным покрытием или смазкой) и схватывание между резцом и деталью ( $\mu=0,5$ ).

При врезании инструмента в деталь поля напряжений и деформаций устанавливаются очень быстро. Пробные расчеты показали, что для этого достаточно перемещения реза  $U=5-10$  мкм. При дальнейшем врезании идет только количественный рост напряжений и деформаций без качественного перестроения картины. Представленные ниже результаты получены для врезания инструмента  $U=50$  мкм.

МКЭ-моделирование производилось для случая низкоскоростного чистового резания. Поэтому температурные и динамические эффекты не учитывались.

Рис.1 отражает деформационную ситуацию возле режущей кромки. Показанные здесь сетки конечных элементов являются одновременно координатными сетками, так как через границы элементов моделируемый материал не перемещается.

Исходно (рис.1, а) узлы конечных элементов реза и детали почти совпадают. Две пары совпадающих узлов выделены двумя парами стрелок. Один из элементов детали на контакте выделен черным цветом. Он имеет почти квадратную форму.

В отсутствие трения ( $\mu=0$ ; рис. 1, б) после врезания резца на 50 мкм контактные элементы детали подвергаются равномерному сплющиванию. Выделенный элемент на рис. 1, б становится примерно вдвое тоньше и длиннее. Однако он сохраняет почти прямоугольную форму. Следовательно, деформация идет по двухосной схеме «растяжение» (вдоль контакта) — «сжатие» (перпендикулярно контакту).

Сетка резца не претерпевает видимых формоизменений. Поэтому узлы детали интенсивно скользят относительно инструмента. Верхняя пара стрелок на рис. 1, б расходится на 12 мкм, а нижняя — на 24 мкм. Между средней и верхней третями закругления режущей кромки обнаруживается место разделения (выделено черной точкой). Здесь узлы инструмента и детали остаются неподвижными относительно друг друга. Выше точки разделения обрабатываемый материал скользит по передней поверхности вверх «в деталь». Ниже точки разделения металл уходит вниз и влево под заднюю поверхность инструмента («в деталь»).

При схватывании на контакте ( $\mu=0,5$ ; рис. 1, в) деформация элементов детали идет весьма неравномерно. Точка разделения остается в прежнем положении. Выше нее проскальзывания и деформации невелики. Верхняя пара стрелок расходится только на 3 мкм. Это сказывается блокирующее действие трения, стремящегося создать перед инструментом застойную область.

Ниже точки разделения относительное скольжение ускоряется. Для нижней пары стрелок оно составляет 17 мкм. Деформация обрабатываемого металла идет, в основном, под нижней третью закругления режущей кромки. Здесь ведущей является схема стссенного сдвига. Поэтому выделенный конечный элемент приобретает форму вытянутого ромба.

На рис. 2 а,б представлены картины интенсивности напряжений  $\sigma_i$  на закруглении режущей кромки. Высокий уровень  $\sigma_i$  указывает области, склонные к пластической деформации (критерий пластичности Губера-Мизеса). Картина  $\sigma_i$  важна с точки зрения устойчивости режущей кромки инструмента к пластической деформации (оседанию кромки). Рис. 2, а относится к случаю пренебрежимо малого трения ( $\mu=0$ ), а рис. 2, б — к случаю пластического трения (схватыванию) ( $\mu=0,5$ ). Цены изолиний на обоих рисунках одинаковы. Черный цвет соответствует  $\sigma_i \geq 1600$  МПа.

В отсутствие трения  $\sigma_i$  концентрируется (темная область) в глубине режущего материала, примерно возле центра дуги закругления режущей кромки. Максимальный уровень  $\sigma_i$  составляет 1710 МПа. Вероятно, область концентрации  $\sigma_i$  заглублена из-за эффекта фокусирования нагрузок. Именно возле центра дуги закругления сходятся линии давления со всех участков закругления режущей кромки.

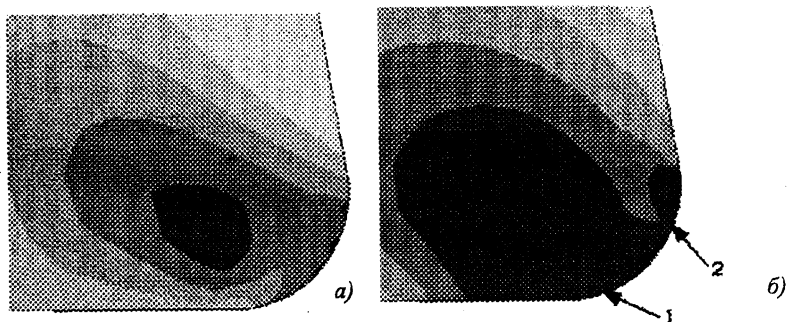


Рис. 2. Картины интенсивности напряжений  $\sigma_1$  в резце возле закругления режущей кромки для коэффициентов трения  $\mu = 0$  (а) и  $\mu = 0,5$  (б)

Ситуация на рис. 2, а представляется малоопасной в смысле пластического оседания режущей кромки. При перегрузке инструмента пластические деформации начнутся локально. Очаг деформаций (темная область) будет окружен упругим материалом. Общего пластического движения режущей кромки не произойдет, по крайней мере, в начале перегрузки резца.

Сильное трение (рис. 2, б) резко увеличивает опасность пластического течения. Темная область выходит на контактную поверхность и захватывает почти всю кромку. Пик интенсивности напряжений  $\sigma_1 = 2840$  МПа (стрелка 1) лежит в нижней трети дуги закругления. Именно здесь ожидается начало пластического оседания кромки.

Стрелка 2 на рис. 2, б указывает локальное понижение уровня  $\sigma_1$ . Как раз здесь находится точка разделения потоков обрабатываемого материала «в стружку» и «в деталь».

Итак, для повышения устойчивости кромки к пластической деформации необходимо снижать контактное трение.

Известно, что твердый сплав склонен к хрупкому разрушению даже при небольших уровнях растягивающих напряжений. Поэтому оценим распределение максимального главного напряжения  $\sigma_1$ .

В отсутствие контактного трения ( $\mu=0$ ) напряжение  $\sigma_1$  в районе закругления режущей кромки везде отрицательно. Следовательно, существует состояние объемного сжатия. Опасность хрупкого разрушения невелика.

Для случая схватывания ( $\mu=0,5$ ) картина  $\sigma_1$  приведена на рис.3. На ней обнаруживаются область сжатия 1 ( $\sigma_1 = -1080$  МПа) и область растяжения 2 ( $\sigma_1 = 162$  МПа). Стрелки 1 и 2 имеют одинаковое положение на рис. 2, б и 3. Следовательно, область объемного сжатия 1 (рис.3) покрывает место вероят-

ного начала пластического течения. Это положительно в смысле блокирования микроразрушений в ходе пластической деформации.

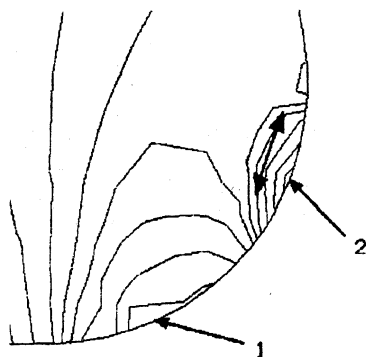


Рис. 3. Картина максимального главного напряжения  $\sigma_1$  на закруглении режущей кромки для  $\mu = 0,5$  (в области 1  $\sigma_1 = -1080$  МПа; в области 2  $\sigma_1 = 162$  МПа)

Область растяжения 2 соответствует точке разделения обрабатываемого металла. Здесь напряжение  $\sigma_1$  направлено (двойная стрелка) примерно параллельно контактной поверхности. Поэтому, есть возможность роста хрупкой трещины из области 2 перпендикулярно контактной поверхности. Такая трещина ведет к выкрашиванию всей закругленной части режущей кромки.

Уровень растягивающих напряжений в области 2 относительно невелик ( $\sigma_1 = 162$  МПа). Однако хрупкому разрушению здесь должны способствовать пульсации контактных сил, характерные для схватывания. Итак, МКЭ-моделирование указывает на опасность разрушений в области растяжения 2 при условии сильного контактного трения.

Картина минимального главного напряжения  $\sigma_3$  для случая  $\mu=0,5$  приведена на рис.4. Она подтверждает, что нижняя треть закругления режущей кромки находится в состоянии сильного объемного сжатия ( $\sigma_3$  опускается здесь до  $-4120$  МПа). Достижимый уровень напряжения сжатия близок к пределу прочности на сжатие твердых сплавов.

На рис.4 представлена также эпюра давления по линии контакта (нормального контактного напряжения). Давление максимально в средней трети закругления режущей кромки (максимальное  $p = 2810$  МПа). Большое расхождение между экстремумами напряжения  $\sigma_3 = -4120$  МПа и давления  $p = 2810$  МПа указывает, что в формировании  $\sigma_3$  большую роль играют касательные контактные напряжения.

Эпюры давлений для коэффициентов трения  $\mu=0$  и  $\mu=0,5$  мало отличаются друг от друга.

Касательные контактные напряжения (удельные силы трения) для  $\mu=0,5$  отображены эпюрой на рис. 5. Стрелки показывают направление сил трения по отношению к резу. В точке разделения (черная точка) наблюдается реверс направления сил трения (на эпюре меняется знак). Это подтверждает наличие процесса разделения металла.

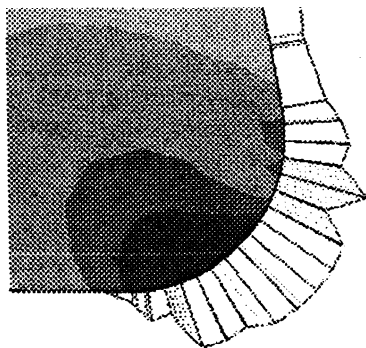


Рис. 4. Распределение минимального главного напряжения  $\sigma_3$  (черный цвет соответствует минимуму  $\sigma_3 = -4120$  МПа) по закруглению режущей кромки и эпюра контактных давлений  $p$  (в максимуме  $p = 2810$  МПа)

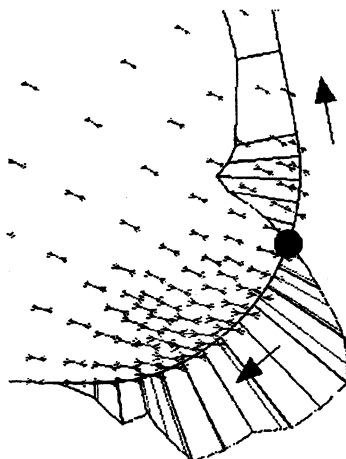


Рис. 5. Направления главного напряжения  $\sigma_3$  внутри закругления режущей кромки и эпюра касательных напряжений на контакте

На рис. 5 по телу резца показаны также малыми стрелками направления главного напряжения  $\sigma_3$ . Направления действия  $\sigma_1$  будут им перпендикулярны. Стрелки  $\sigma_3$  сходятся к нижней и средней третям закругления режущей кромки. Здесь же максимальны силы трения на эпюре. Следовательно, этот район является максимально нагруженным сжатием.

#### **Выводы:**

1. Для предотвращения пластического деформирования и хрупкого разрушения режущей кромки инструмента очень важно снижение трения на закруглении кромки (эффективные покрытия, смазка и т.д.).

2. В условиях сильного трения закругление режущей кромки склонно к пластическому оседанию. Вероятное место начала пластического течения — нижняя треть закругления (прилегающая к задней поверхности).

3. Для разных коэффициентов трения место разделения обрабатываемого материала на потоки «в стружку» и «в деталь» находится на резце между средней и верхней (прилегающей к передней поверхности) третями закругления режущей кромки.

4. В условиях сильного трения под местом разделения в инструменте возникает область локального растяжения. Она опасна с точки зрения хрупкого трещинообразования и последующего обрушения закругления режущей кромки.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. ХаеТ Г.Л. Прочность режущего инструмента. — М.:Машиностроение. 1975. — 168 с.
2. Довнар С.С. Численно-математическая модель для определения напряжений, возникающих при обработке металлов резанием // Известия АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. — 1985. — № 2. — С.10–13.
3. Рамалингэм, Лен. Исследование распределения напряжений методом фотоупругости при прямоугольном резании // Труды АОИМ. Конструирование и технология машиностроения. — 1971. — № 2. — С.153–164.
4. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. — М.:Металлургия. 1983. — 352 с.