

## ЛИТЕРАТУРА

1. KENNAMETAL HERTEL. Обзор производственной программы. Режущий и вспомогательный инструмент. 2000 г.
2. SANDVIK COROMANT. Металлообработка. Вращающийся инструмент. 2001.
3. Каталог ISCAR. 2001.
4. Каталог Frasen. 1999.
5. Каталог MITSUBISHI CARBIDE. GESAMTKATALOG 2002-2003.
6. Каталог МКТС. 1997.
7. Каталог Seco Selection. 2002.
8. Справочник технолога. Под ред. Малова. Т. 2. — М., Машиностроение, 1972. — 568 с.
9. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Часть I. — М., Машиностроение, 1974. — 416 с.

УДК 621.9.011:517.962.1

С.С. Довнар

### **МКЭ-МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕЗАНИЯ РЕЗЦА С ЗАКРУГЛЕННОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

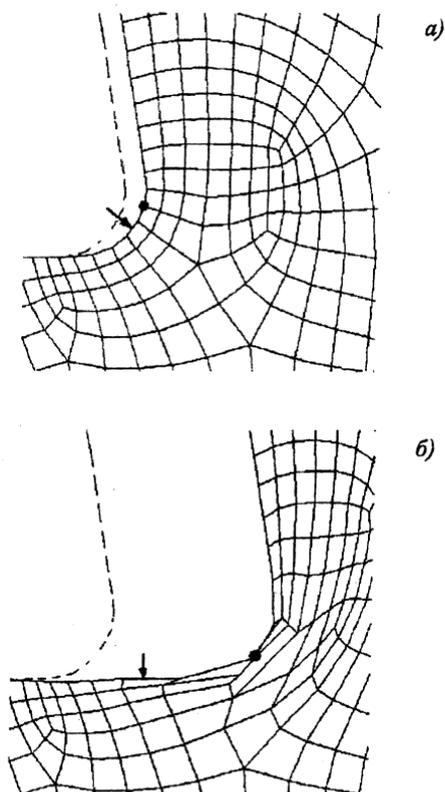
Обрабатываемый материал возле режущей кромки наиболее напряжен и деформирован. Исследовать его состояние экспериментально очень сложно. Наиболее перспективно численно-математическое моделирование методом конечных элементов (МКЭ) [1,2].

Известно, что процесс резания металлов является сочетанием стадии объемных деформаций и стадии локализованного скольжения [3,4]. При движении резца эти стадии меняют друг друга через промежутки порядка 10–100 мкм.

В настоящей работе с помощью МКЭ моделировалась первая от момента начала резания стадия объемной деформации. Стояла задача отследить объемные деформации до как можно большего перемещения резца. Особенности моделирования являлись существенное закругление режущей кромки ( $\rho=60$  мкм) и варьирование коэффициентом трения  $m$  на контакте между резцом и обрабатываемым материалом (от 0,05 до 1).

МКЭ-расчеты были выполнены для материала с модулем упругости  $E=2 \cdot 10^5$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu=0,3$ . Учитывались пластичность и упрочняемость материала (предел текучести  $\sigma_T = 750$  МПа; критерий теку-

части Губера-Мизеса; билинейный закон упрочнения при касательном модуле упрочнения  $E_t = 2,5 \cdot 10^3$  МПа). Эти свойства близки к характеристикам высокоуглеродистых и легированных инструментальных сталей [5].



*Рис.1. Деформация сетки конечных элементов при врезании реза на 20 мкм (а) и на 148 мкм (б) (исходное положение инструмента показано пунктиром; коэффициент трения  $\mu=0,2$ )*

Рассматривалась плоская упруго-пластическая статическая задача. Полагалось, что резание является низкоскоростным (например, протягивание или развертывание). Поэтому температурные и динамические эффекты не учитывались [2].

Зона резания была представлена сеткой четырехугольных 8-узельных конечных элементов. Эти элементы обеспечивают квадратичную интерполя-

цию перемещений и поэтому обладают хорошей точностью. Сетка конечных элементов была сгущена возле закругления режущей кромки.

Глубина резания равнялась 200 мкм, а толщина стружки — 400 мкм. Режущий инструмент моделировался как абсолютно жесткий с передним углом  $\gamma = 10^\circ$  и задним углом  $\alpha = 30^\circ$ . Малый задний угол имитировал наличие на задней поверхности резца площадки износа.

Резец перемещали шагами по 25 мкм. На каждом шаге путем итерационной процедуры находилась серия промежуточных решений. Достигнутые в очередном решении напряжения и деформации служили начальными в следующем решении. МКЭ-расчет производился с учетом геометрических нелинейностей.

Между резцом и зоной резания располагались контактные конечные элементы. Они позволяли автоматически определять протяженность контакта и обеспечивали скольжение обрабатываемого материала по инструменту. Силы трения учитывались через коэффициент трения  $\mu$ . При моделировании ему назначали величины  $\mu = 0,05$  (качественное износостойкое покрытие или проникновение в контакт высокоэффективной СОЖ),  $\mu = 0,2$ ,  $\mu = 0,5$  (т.н. пластическое трение) и  $\mu = 1$  (прилипание обрабатываемого материала к резцу).

МКЭ-расчеты показали, что картина напряженно-деформированного состояния устанавливается после врезания очень быстро. Для этого достаточно 5–10 мкм перемещения резца. Дальнейшее движение резца на всем прослеженном участке вносило в поля напряжений и деформаций только количественные изменения.

На рис. 1, а представлена сетка конечных элементов возле закругления режущей кромки при относительно малом перемещении резца  $U=20$  мкм ( $\mu=0,2$ ). Моделируемый материал не перемещается через границы конечных элементов и сетка не перестраивается. Поэтому сетка конечных элементов может служить естественной координатной сеткой для оценки деформаций. На рис. 1, а элементы близки к равносторонней форме. С закруглением режущей кромки контактируют 8 конечных элементов.

На рис. 1, б показано состояние сетки после перемещения резца  $U=148$  мкм. Большее перемещение проследить не удалось из-за нарастающих искажений формы конечных элементов (крайняя сплюсченность и перекосы) и связанного с этим расхождения итерационного процесса.

Основная особенность деформаций на рис. 1, б — элементы соскальзывают с закругления режущей кромки. Они уходят или вверх по передней поверхности («в стружку»), или вниз и влево в новый поверхностный слой («в деталь»).

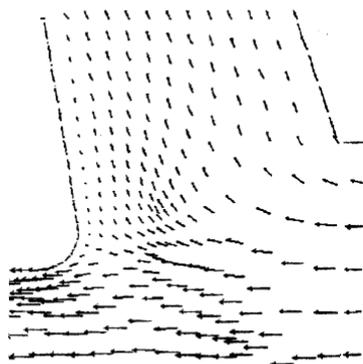


Рис.2. Векторы перемещения материальных точек в зоне резания относительно резца (ход резца  $U=50$  мкм, коэффициент трения  $\mu=1$ )

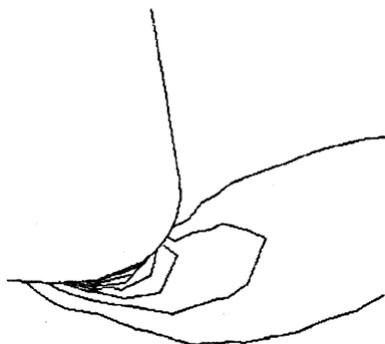


Рис.3. Концентрация пластической деформации под закруглением режущей кромки для хода резца  $U=50$  мкм и коэффициента трения  $\mu=1$  (в максимуме интенсивность деформаций  $\epsilon_i = 1,78$ ; шаг между изолиниями  $\Delta\epsilon_i = 0,225$ )

Например, элемент, отмеченный стрелкой, перемещается с середины закругления (рис. 1, а) под заднюю поверхность инструмента (рис. 1, б). Вместо восьми элементов перед закруглением режущей кромки остается только два (отмечены точкой на рис. 1 а, б).

Это идет процесс разделения материала припуска на стружку и новый поверхностный слой детали. Место разделения примерно соответствует точке на рис. 1 а, б. Ниже этого места материал подминается закруглением режущей кромки в поверхностный слой детали. Следовательно, закругление режущей кромки работает как инструмент ППД.

Рис.1,6 показывает также, что объемные пластические деформации не способны довести процесс разделения до конца. Конечные элементы на режущей кромке сильно вытягиваются, сплюсциваются, начинают терять реалистичную форму, но не расцепляются. В действительности объемная деформация должна на время сменяться локализованным скольжением [1,3]. Оно и обеспечит окончательное разделение слоев материала перед режущей кромкой.

Процесс разделения материала наблюдался при всех условиях моделирования. На рис.2 для сильного трения ( $\mu = 1$ ) и хода резца  $U = 50$  мкм показаны векторы перемещения материальных точек в зоне резания. Видны медленный поток материала «в стружку», быстрый поток «в деталь», а также застойная область на контакте с резцом.

Соответствующее распределение интенсивности пластической деформации  $\epsilon_i$  приведено на рис.3. Возле вершины резца обнаруживается очаг максимальных деформаций. Он контактирует с нижней третью закругления режущей кромки и, соответственно, лежит прямо под местом разделения материала. В этом очаге интенсивность деформаций достигает  $\epsilon_i = 1,78$  (логарифмическая деформация; ход резца  $U = 50$  мкм,  $\mu = 1$ ). Для малого трения на контакте ( $\mu = 0,05$ ) интенсивность деформаций несколько меньше  $\epsilon_i = 1,18$ .

При уменьшении трения место разделения материала на закруглении режущей кромке поднимается вверх, к передней поверхности. Снижение коэффициента трения  $\mu$  с 0,5 до 0,05 приводит к подъему места разделения примерно на четверть дуги. Следовательно, при уменьшении трения возрастает подминающе-выглаживающее действие закругления режущей кромки.

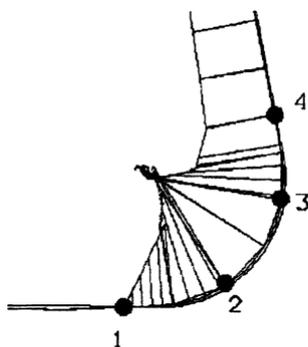


Рис.4. Эюра давлений на контакте закругления режущей кромки и обрабатываемого материала (максимум 2560 МПа в секторе 2-3)

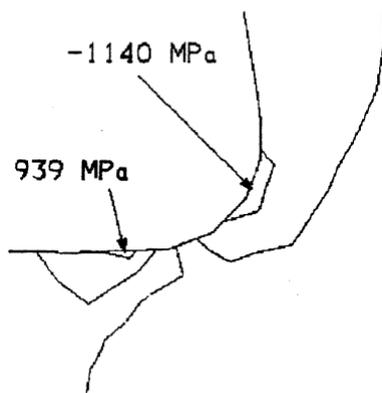


Рис.5. Картина среднего напряжения  $\sigma_\varphi$  ( $\sigma_\varphi = -1140 \text{ МПа}$  в области объемного сжатия;  $\sigma_\varphi = 939 \text{ МПа}$  в области объемного растяжения)

Контактная поверхность возле места разделения является высоконагруженной. На рис.4 показана эпюра давлений ( $\mu = 0,05$ ; для остальных коэффициентов трения эпюры подобны). В секторе 2-3 (место разделения) наблюдается пик давления. Оно достигает здесь  $2560 \text{ МПа}$ , что более чем втрое превосходит предел текучести  $\sigma_t = 750 \text{ МПа}$ . Выше точки 4 (передняя поверхность резца) давление находится на уровне  $1100\text{--}1400 \text{ МПа}$ . От точки 2 к 1 давление монотонно падает до нуля. Здесь контакт резца и обрабатываемого материала завершается.

Итак, выявлена локальная перегруженность контакта на середине закругления режущей кромки. Это существенно, в том числе и для прочности инструмента.

На рис.5 приведена картина среднего (гидростатического) напряжения  $\sigma_\varphi$ . Перед закруглением режущей кромки выявляется область объемного сжатия ( $\sigma_\varphi = -1980 \text{ МПа}$ ). Под задней поверхностью резца обнаруживается область объемного растяжения ( $\sigma_\varphi = 1740 \text{ МПа}$ ). Она весьма опасна с точки зрения поверхностных разрушений. Приведенные величины  $\sigma_\varphi$  соответствуют сильному трению ( $\mu = 1$ ). При понижении  $\mu$  до  $0,05$  области объемного сжатия и растяжения ослабевают примерно в полтора раза (до  $-1140 \text{ МПа}$  и  $939 \text{ МПа}$  соответственно).

Следовательно, снижение трения благоприятно. Оно уменьшает вероятность трещинообразования в поверхностном слое детали. Одновременно снижается нагруженность режущей кромки от действия области объемного сжатия.

## **Выводы:**

1. Построена упруго-пластическая контактная МКЭ-модель зоны резания металла.
2. Виртуально отслежены объемные деформации обрабатываемого материала при врезании инструмента на расстояние порядка 2,5 радиусов закругления режущей кромки.
3. Выявлен процесс разделения металла перед закруглением режущей кромки на потоки «в стружку» и «в деталь».
4. Показано, что объемная деформация не обеспечивает полного разделения материала. Сплюсненные и вытянутые микрообъемы металла перед режущей кромкой остаются сцепленными. Для завершения разделения необходимо локализованное скольжение, например, по фронтам сдвига.
5. Обнаружен локальный пик контактного давления на режущей кромке, соответствующий месту разделения. Это может быть существенно для прочности инструмента.
6. Выявлено, что закругление режущей кромки подминает в новый поверхностный слой около половины контактирующего с закруглением материала. Эффективность закругленной режущей кромки как инструмента ППД возрастает при снижении трения на контакте.
7. Возле режущей кромки МКЭ-моделированием обнаружены область объемного сжатия, область объемного растяжения, а также область концентрации объемных пластических деформаций.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Довнар С.С. Трещинообразование при обработке металлов резанием // *Машиностроение*. — 1983. — №8. — С.33–36.
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. Блэк. О механизме больших пластических деформаций. Электронная микроскопия металлических стружек // *Труды АОИМ. Конструирование и технология машиностроения*. — 1971. — № 2. — С.132–152.
4. Блэк. Пластинчатая структура и фронты сдвига, возникающие в процессе большой пластической деформации // *Труды АОИМ. Конструирование и технология машиностроения*. — 1972. — № 2. — С.311–321.
5. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. *Справочник*. — М.: Металлургия. 1983. — 352 с.