

Для технолога-машиностроителя дополнительно необходимы знания по рациональной, с точки зрения МПЗ, эксплуатации режущих инструментов, а технологам-инструментальщикам – знания для разработки оптимального по МПЗ технологического процесса изготовления инструмента.

По такой методике автор излагает дисциплину «Режущий инструмент» в Белорусском национальном техническом университете с 1983 г. В соответствии с ней разработаны и опубликованы следующие учебные пособия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шагун В.И. Режущий инструмент. Основы теории проектирования. – Мн.: ДизайнПРО, 1998. – 112 с. 2. Шагун В.И. Режущий инструмент. Проектирование. Производство. Эксплуатация. – Мн.: НПО «ПИОН», 2002. – 496 с. 3. Шагун В.И. Металлорежущие инструменты. – М.: Высш. шк., 2007. – 423 с.

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С.С.

НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛА

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Производилось численно-математическое моделирование зоны резания металла в условиях наростообразования. Был применен метод конечных элементов (МКЭ). Основой для компьютерных расчетов служила плоская геометрическая модель зоны резания (рис.1). Она построена на основе известного рисунка процесса наростообразования [1, с.85].

Модель включает в себя деталь (workpiece), стружку (chip), резец (tool), нарост (build-up). Деталь и стружка разделены фронтом сдвига (front of shear) [2]. Деталь в ходе моделирования является неподвижной (на это указывает отметка “0 mkm” на рис.1). Резец перемещается справа на лево и совершает пробный шаг на расстояние 10 мкм (отметка “10 mkm” на границе резца).

Особенностью данной модели является введение прослойки (“layer” на рис.1) между деталью и наростом.

Полагается, что прослойка – это упрочняющийся слой металла, переходящий из состава детали в нарост. В работе границам прослойки дана возможность локализованного скольжения. Материал детали может скользить по левой границе прослойки (“Left” на рис.3) вниз или вверх. Сама прослойка может смещаться относительно нароста по своей правой границе (“Right” на рис.3).

Хорошо известно [3], что в сильно деформируемом металле самопроизвольно возникают волокнистые структуры. Они формоизменяются путем сочетания объемной пластической деформации и локализованного скольжения по своим границам. В работе предполагается, что такая волокнистая структура – прослойка – регулярно возникает на вершине нароста, деформируется, упрочняется и, наконец, входит в состав нароста.

В модели на рис.1 подразумевается, что усилие с резца на деталь передается, в основном, через прослойку.

Дополнительно, стружка касается передней поверхности резца высоко над наростом в районе “contact” и имеет там возможность скольжения.

По геометрической модели была построена плоская конечно-элементная модель из 8-узельных элементов. В общем случае элементы имеют форму криволинейных четырехугольников и обеспечивают квадратичную аппроксимацию перемещений. Это позволяет с хорошей точностью вычислять напряжения и деформации. По границам между всеми объектами, именованными на рис.1, введены контактные конечные элементы. В части мест контактные элементы установлены в

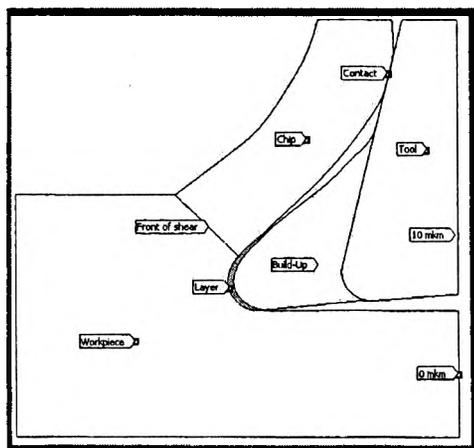


Рис.1. Геометрическая модель зоны резания с наростом

заблокированное состояние. Это обеспечивает полное сцепление между резцом и наростом, а также между деталью и стружкой.

На границах прослойки контактные элементы настроены на локализованное проскальзывание. Ввиду отсутствия экспериментальных данных о характеристиках проскальзывания в зоне резания, было принято, что оно идет по закону трения Кулона с коэффициентом трения $f = 0,2$.

Сетка включала в себя 2083 конечных элемента и 15751 узел с тремя степенями свободы каждый. Модель зоны резания характеризовали следующие параметры: глубина резания $t = 250$ мкм, передний угол $\gamma = 15$, задний угол $\alpha = 5$, радиус закругления режущей кромки резца $\rho_1 = 60$ мкм, высота нароста $H = 250$ мкм, радиус закругления его вершины $\rho_2 = 70$ мкм. Толщина прослойки в середине составляла $h = 12$ мкм.

Моделировался упруго-пластичный изотропный обрабатываемый материал с модулем упругости $E = 200000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. Предел текучести σ_T материала детали был принят равным 750 МПа. Это примерно соответствует стали У8 в отожженном состоянии. Были использованы критерий текучести Губера–Мизеса и билинейный закон упрочнения. Касательный модуль упрочнения был установлен на уровне $E_t = 2500$ МПа [4].

В зоне резания присутствует существенный наклеп. Для упрощения в модели принято, что наклеп изменяется ступенчато. Для всей стружки предел текучести назначен равным $\sigma_T = 1000$ МПа. Для нароста $\sigma_T = 1500$ МПа (вдвое больше, чем у обрабатываемого материала). Для прослойки принято $\sigma_T = 1250$ МПа. Резец моделировался как чисто упругое тело.

Вся зона резания считалась находящейся в плоско-деформированном состоянии. Это означает нулевые перемещения вне плоскости моделирования. Однако нормальные этой плоскости напряжения могут быть существенными.

В ходе МКЭ-расчетов было произведено пробное перемещение резца на расстояние $\delta = 10$ мкм (справа налево на всех нижеследующих рисунках). Вместе с резцом перемещался прикрепленный к нему нарост. Именно такой шаг δ был выбран исходя из более ранних расчетов [5]. Они показали, что пробное перемещение 5-10 мкм достаточно для стабилизации в зоне резания картин напряжений и приращений пластической деформации.

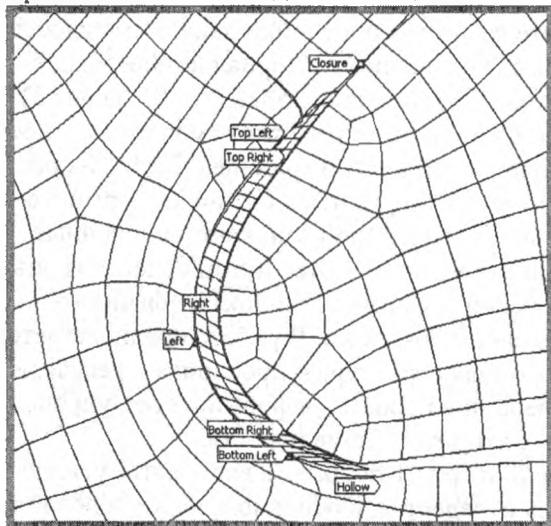


Рис.3. Деформации в районе прослойки после пробного шага

По-видимому, выше верхней отметки “9%” проходит поток «в стружку». Ниже нижней отметки “9%” движется поток «в новый поверхностный слой детали». Между отметками “9%” проходит центральный поток – «в нарост». Три расходящихся потока предполагают

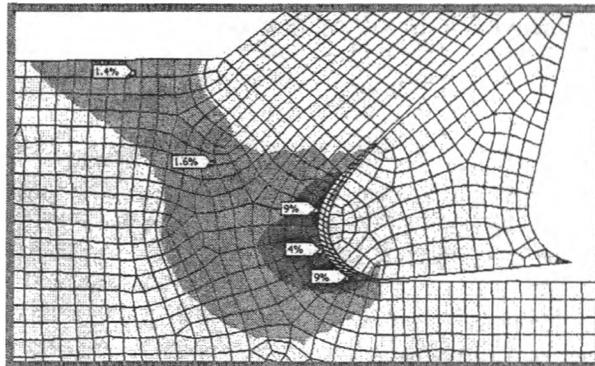


Рис.2. Картина приращения интенсивности пластической деформации ϵ_p после пробного шага $\delta = 10$ мкм

Пробное перемещение производилось путем ступенчатого нагружения. При этом в расчетах учитывались нелинейности сразу трех видов: от пластического течения, от изменения геометрии зоны резания и от скольжения в контактах.

На рис.2 представлена картина интенсивности пластической деформации ϵ_p в зоне резания. Пробный шаг $\delta = 10$ мкм выявил зону стружкообразования ($\epsilon_p = 1,4 \dots 1,6 \%$). В стружке и в наросте приращение пластических деформаций практически не происходит. Самое сильное пластическое течение наблюдается перед прослойкой. Здесь есть два максимума ϵ_p (отметки “9%”). Между ними деформация идет несколько медленнее (отметка “4%”).

Если нарост рассматривать, как режущее лезвие, то на его закругленной вершине – прослойке – должно происходить разделение потоков обрабатываемого материала [6].

По-видимому, выше верхней отметки “9%” проходит поток «в стружку». Ниже нижней отметки “9%” движется поток «в новый поверхностный слой детали». Между отметками “9%” проходит центральный поток – «в нарост». Три расходящихся потока предполагают

две точки разделения. Вероятно, эти точки примерно соответствуют верхней и нижней отметкам «9%».

По линии «9% - 4% - 9%» формируется новая прослойка. Она расплющивается, вытягивается и со временем выделит себя локализованным проскальзыванием на границах. Моделируемая же сейчас прослойка стабилизируется и полностью войдет в состав нароста.

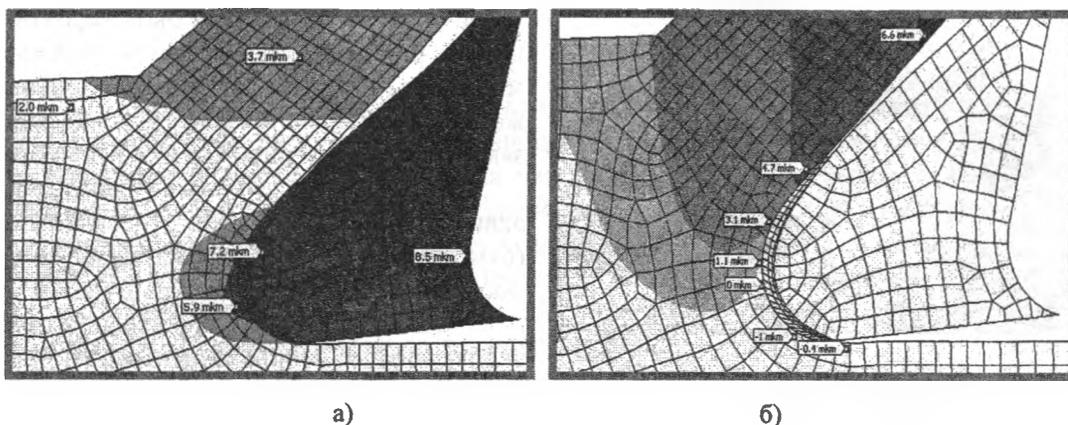


Рис.4. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) перемещения в зоне резания

В настоящей модели пределы текучести обрабатываемого материала и материала нароста различаются вдвое (750 и 1500 МПа). Рис. 2 показывает, что этого достаточно, чтобы в наросте не происходило заметного пластического течения. Тем самым поддерживается устойчивость нароста. Даже в прослойке предел текучести $\sigma_T = 1250$ МПа достаточен для сдерживания пластических деформаций. Они происходят только на верхнем и нижнем концах прослойки. По-видимому, такой предел текучести соответствует довольно позднему этапу развития прослойки.

Деформационные подвижки в районе прослойки после пробного шага $\delta = 10$ мкм отражены на рис.3. Локализованное скольжение происходит, в основном, по левой границе прослойки. Правая граница в данных условиях малоактивна. Скольжение по ней составляет около 10% от уровня левой границы.

Локализованное скольжение максимально на концах прослойки. В центре (отметки «Left» и «Right» на рис.3) оно практически отсутствует. Это место можно назвать точкой торможения. Оно соответствует отметке «4%» на рис.2.

На рис.3 вверху, в районе отметки «Top Left» обрабатываемый материал скользит вправо и вверх по левой границе, «обгоняя» отметку «Top Right». Внизу, в районе отметки «Bottom Left» обрабатываемый материал скользит по левой границе вправо и вниз, «обгоняя» отметку «Bottom Right». В обоих случаях абсолютные величины скольжения составляют около 7 мкм.

На нижнем конце прослойки наблюдается появление впадины (отметка «Hollow») на вновь образованной поверхности детали. Это может быть существенно с точки зрения проникновения СОЖ к вершине нароста.

На верхнем конце прослойки, наоборот, проявляется тенденция к смыканию нароста и стружки (отметка «Closure»).

На рис.4 представлены картины перемещений в зоне резания вдоль направления резания (а) и перпендикулярно ему (б). Резец условно не показан. Видно (рис.4, а), что интенсивнее всего перемещается та часть обрабатываемого металла, которая примыкает к прослойке и наросту (5,9 мкм). Внутри нароста продольные перемещения изменяются от 7,2 до 8,5 мкм. Это указывает на сильное упругое сжатие в нем.

Отметка «0 mkm» на рис.4, б говорит об отсутствии скольжения вдоль прослойки. Выше и ниже отметки проскальзывание идет в противоположных, расходящихся направлениях. Отметка «-0.4 mkm» подтверждает, что под наростом во вновь образованной поверхности детали формируется небольшая впадина.

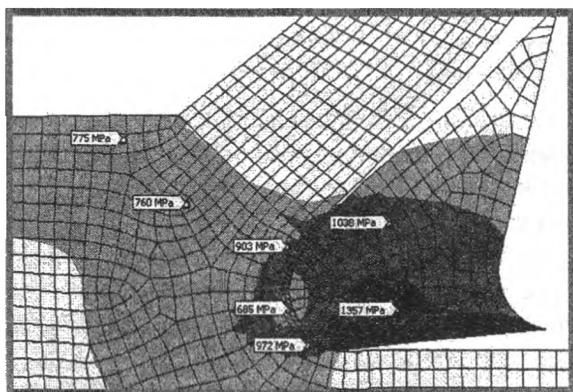


Рис.5. Картина эквивалентных напряжений σ_e в зоне резания

на ниже отметки проскальзывание идет в противоположных, расходящихся направлениях. Отметка «-0.4 mkm» подтверждает, что под наростом во вновь образованной поверхности детали формируется небольшая впадина.

На рис.5 дано распределение эквивалентных напряжений (напряжений по Мизесу) σ_i в зоне резания. Эта характеристика напряженного состояния связана с касательными напряжениями и пластическим течением. Выявляется, что нарост нагружен весьма неравномерно. Он сильно сжат ($\sigma_i = 1357$ МПа) в своей нижней части. Именно здесь передается основная часть силы резания.

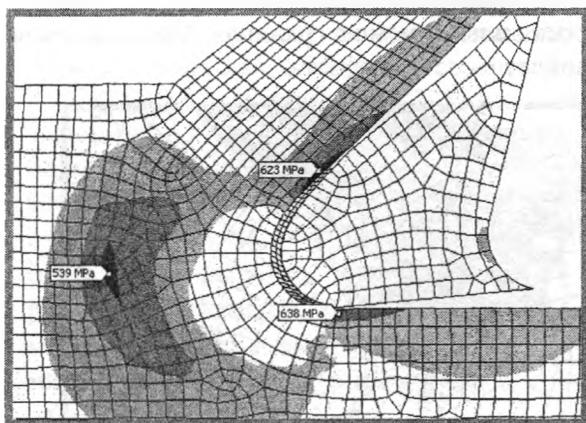


Рис.6. Распределение максимального главного напряжения σ_1 и области растяжения

Концентрация сжимающих напряжений по мере увеличения нароста может быть вероятной причиной его регулярного обрушения. Особенно важными являются сильное сжатие и высокие касательные напряжения представляются в месте контакта нароста с закруглением режущей кромки инструмента. Интересно, что возле точки торможения эквивалентное напряжение относительно мало (отметка “685 МПа”). Это указывает на замедленность здесь пластических деформаций. Возле верхней и нижней точек разделения эквивалентные напряжения повышаются (903 и 972 МПа соответственно).

На рис. 6 приведена картина максимального главного напряжения σ_1 . В целом, она соответствует более ранним МКЭ-расчетам для зоны резания без нароста [5]. Выявляются три области растяжения. Область “539 МПа” заглублена и находится далеко впереди нароста. Ее следует классифицировать как т.н. переднюю область растяжения [5]. Область “638 МПа” возле нижнего конца прослойки соотносится с задней областью растяжения. Именно она образует впадину (“Hollow”) на рис. 3.

Особенностью зоны резания с наростом является третья область растяжения (отметка “623 МПа” на рис.6). Она обусловлена растяжением волокон обрабатываемого материала возле верхнего конца прослойки.

В заключение на рис.7 представлена картина напряжения σ_z , нормального к плоскости моделирования. Почти по всей зоне резания оно относительно невелико и является сжимающим. Напряжение σ_z концентрируется только перед прослойкой, как раз в точке торможения. Здесь оно достигает высокого по абсолютной величине уровня $\sigma_z = -1277$ МПа. Область торможения находится близко к состоянию гидростатического сжатия. Концентрация напряжений подчеркивает существенность области торможения в системе напряжений и деформаций зоны резания.

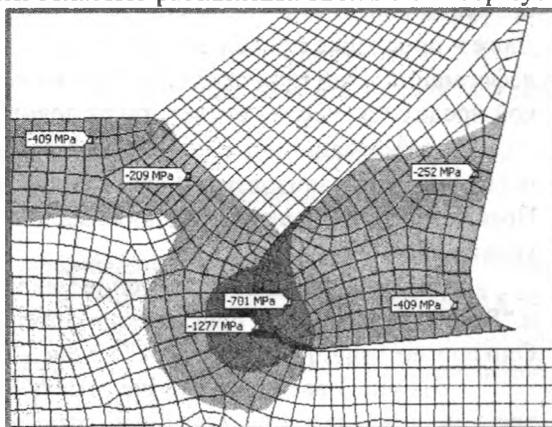


Рис.7. Картина напряжения σ_z (нормального к плоскости моделирования)

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985.
2. Блэк. Пластинчатая структура и фронты сдвига, возникающие в процессе большой пластической деформации: труды АОИМ. Конструирование и технология машиностроения. – 1972. – № 2. – С. 311–321.
3. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986.
4. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
5. Довнар, С.С. Численно-математическая модель для определения напряжений, возникающих при обработке металлов резанием / С.С. Довнар // Известия АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. – 1985. – № 2. – С. 10–13.
6. Довнар, С.С. МКЭ-моделирование врезания резца с закругленной режущей кромкой: Респ. межвед. сб. «Машиностроение», 2004. – Вып. 20. – С. 35–41.