

РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

УДК 621.9.011:517.962.1

С.С. ДОВНАР

КОНТАКТНОЕ СХВАТЫВАНИЕ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

При изучении напряженно-деформированного состояния металла в зоне резания путем численно-математического моделирования с помощью метода конечных элементов (МКЭ) были выявлены область объемного сжатия возле режущей кромки инструмента, а также передняя и задняя области растяжения, имеющие непосредственное отношение к качеству вновь образуемого поверхностного слоя детали. Базовое решение [1, 2] выполнено для случая пренебрежимо малого трения в зоне контакта обрабатываемого металла с инструментом. На практике чаще встречается резание с интенсивным схватыванием, особенно вблизи режущей кромки [3]. Цель настоящей работы – выявить характер влияния фактора схватывания на напряженно-деформированное состояние металла в зоне резания.

В исследовании использована специализированная конечноэлементная модель. Для обеспечения сопоставимости получаемых решений с базовым [1] приняты следующие исходные условия: ортогональное резание, плоская деформация, идеально пластичный обрабатываемый материал с пределом текучести $\sigma_T = 750$ МПа, модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$. Глубина резания $t = 0,2$ мм, передний угол $\gamma = 0$, радиус закругления режущей кромки инструмента $\rho = 0,06$ мм. Рассматриваются низкоскоростная обработка, этап врезания, статические и изотермические условия деформирования.

Картины напряженно-деформированного состояния металла в зоне резания выявлялись путем сообщения инструменту пробного перемещения $u = 10$ мкм. Этого достаточно, чтобы напряжения стабилизировались и пластическое течение материала приняло устойчивые формы [1].

Первый МКЭ-расчет был выполнен для случая полного схватывания между резцом и обрабатываемым металлом по всей длине зоны контакта вдоль передней поверхности и закругления режущей кромки. Выяснилось, что схватывание существенно затрудняет процесс резания. Продольная и поперечная в направлении движения резца составляющие силы резания оказались равными соответственно 312 и 153 Н (на 1 мм длины режущей кромки). Это в 1,6 и 2,2 раза больше, чем в базовом решении.

Максимальное главное напряжение σ_1 (рис. 1) имеет все три характерные области напряжений. Экстремальные напряжения σ_1 в них соответственно равны 1120, 310 и 830 МПа. В базовом решении они составляли 970,

570, 680 МПа. Поэтому можно констатировать определенное возрастание напряжений в области объемного сжатия и ослабление их в передней области растяжения. Однако самым важным представляется то, что схватывание на резце стимулирует развитие задней области растяжения. Здесь напряжения σ_1 достигают того уровня, когда начинает формироваться состояние объемного растяжения металла. Это резко повышает вероятность поверхностных разрушений детали. Кроме того, площадь задней области увеличивается по сравнению с базовым решением примерно на порядок (считая по изолинии "300 МПа").

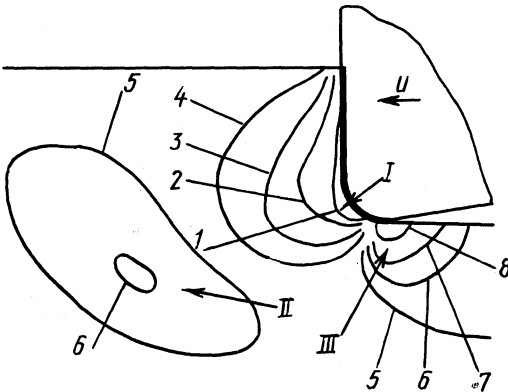


Рис. 1. Изолинии главного напряжения σ_1 при врезании резца в металл в условиях схватывания в зоне контакта:

1 - ~700 МПа; 2 - ~500; 3 - ~300; 4 - 100; 5 - 100; 6 - 300; 7 - 500; 8 - 700 МПа; I - область объемного сжатия; II, III - передняя и задняя области растяжения

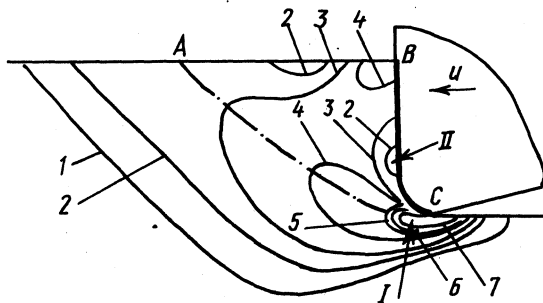


Рис. 2. Изолинии интенсивности пластической деформации ϵ_i :

1 - 0; 2 - 1%; 3 - 2,5; 4 - 5; 5 - 10; 6 - 15; 7 - 20%; I - полоса концентрации деформаций; II - область малых деформаций

Опасность повреждения нового поверхностного слоя растягивающими напряжениями в задней области в полной мере выявляется при сопоставлении картины σ_1 с распределением интенсивности пластических деформаций ϵ_i (рис. 2). Деформации концентрируются под режущей кромкой в узкой полосе пластического течения I. После пробного перемещения резца AC достигает 34 %, в то время как в целом по зоне стружкообразования AC (указана штрихпунктирной линией) интенсивность деформаций составляет несколько процентов. Формирование полосы I связано с обусловленными схватыванием застойными явлениями впереди резца. Металл в области малых деформаций II движется в направлении вектора скорости резания вместе с инструментом. На границе раздела перемещающейся области II и неподвижного тела детали и возникает полоса сильных деформаций I.

Задняя область растяжения (рис. 1) и полоса *I* (рис. 2) перекрываются. В результате создается опасное сочетание: интенсивное пластическое течение металла в условиях сильного растяжения. С позиций механики разрушения такое состояние весьма благоприятно для трещинообразования [4]. Даже если не произойдут макроразрушения, увеличится концентрация микротрещин во вновь образованном поверхностном слое детали. Это снижает эксплуатационные свойства детали, прежде всего сопротивление усталости и коррозии.

Сочетание пластического течения и растягивающих напряжений характерно для резания в условиях схватывания. В базовом варианте, когда трение отсутствует, обе области растяжения находятся вне зоны интенсивных пластических деформаций, которую надежно "прикрывает" собой область объемного сжатия.

Таким образом, схватывание между резцом и обрабатываемым металлом следует рассматривать как фактор, весьма неблагоприятный для целостности нового поверхностного слоя детали. Отрицательное влияние схватывания на качество поверхности со всей полнотой проявляется даже тогда, когда торможение течения обрабатываемого металла происходит только по закруглению режущей кромки (рис. 3). В МКЭ-расчете было "разрешено" свободное скольжение материала относительно резца по передней поверхности *AB*. Вместе с тем схватывание лишь по дуге *BC* оказалось достаточным для формирования задней области растяжения, ни по размерам, ни по максимальному напряжению ($\sigma_1 = 830$ МПа) не отличающейся от своего аналога на рис. 1. Экстремальные напряжения σ_1 в области объемного сжатия и в передней области растяжения равны соответственно -920 и 430 МПа (рис. 3), что сравнительно близко к базовому варианту. На картине σ_1 появляется небольшая новая область растяжения на передней поверхности резца возле точки *B* ($\sigma_1^{\max} = 350$ МПа), несмотря на высокие сжимающие напряжения в зоне контакта.

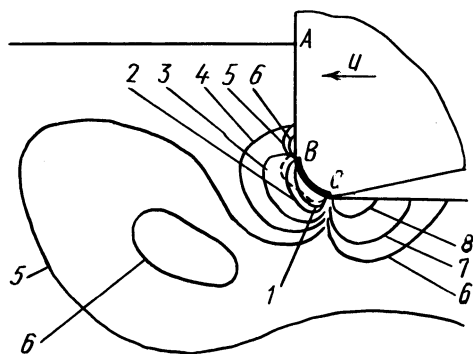


Рис. 3. Изолинии напряжения σ_1 в случае контактного схватывания металла по закруглению режущей кромки *BC* (обозначения изолиний – по рис. 1)

Анализ перемещений металла в зоне резания, выполненный по данным МКЭ-расчета, показал, что перед закруглением режущей кромки возникает заторможенный объем металла (ограничен штриховой линией на рис. 3), по краям которого возле точек *B* и *C* расположены соответственно вновь образовавшаяся и задняя области растяжения. Здесь же возникают интенсивные пластические деформации, связанные с обтеканием остальным металлом затормо-

женного объема. Так, для рассматриваемого решения на картине ϵ_i (не приведена) возле точки C существует полоса типа I (см. рис. 2), в которой интенсивность деформаций достигает 30 %. Следовательно, сохраняется опасность появления поверхностных трещин на детали.

Таким образом, локально напряженно-деформированное состояние металла, при котором формируется новый поверхностный слой детали, зависит главным образом от контактных условий возле режущей кромки. Условия трения на отдаленных от кромки участках передней поверхности здесь не имеют большого значения.

Состояние металла (рис. 3) по существу характеризует этап, предшествующий возникновению нароста. При наличии благоприятных теплофизических условий в нарост должен превратиться заторможенный объем металла на режущей кромке. Оформление нароста произойдет благодаря развитию двух макротрещин, выходящих из задней области растяжения (точка C) и из области растяжения возле точки B . В результате обработанная поверхность получит грубые повреждения, называемые чешуйками или наростными гребешками. Трещины, выходящие из задней области растяжения, после каждого срыва нароста будут оставаться под чешуйками в образуемом поверхностном слое детали. Трещины, зарождающиеся возле передней поверхности резца, должны по мере регулярных разрушений нароста уноситься стружкой. Такие разрывы в стружке и на поверхности детали известны [5].

Рассматриваемое конечноэлементное решение подтверждает принятое в теории резания положение о том, что схватывание возле режущей кромки является необходимым условием наростообразования [3].

Предупреждение схватывания на резце благодаря использованию СОЖ, вероятно, может дать лишь ограниченный эффект. Качество новой поверхности детали в основном зависит от схватывания непосредственно возле режущей кромки, т. е. в месте, наиболее труднодоступном для СОЖ. Большими возможностями обладает резание с периодическим прерыванием контакта металл—резец при защите взаимодействующих поверхностей смазочным материалом. Таким процессом является, например, вибрационная зачистка деталей резанием [6]. Многократное размыкание контакта позволяет зачищать изделия, избегая появления в них макроскопических разрывов.

Самый перспективный путь решения проблемы схватывания связан с температурно-скоростным фактором. Это направление должно быть основано на явлениях локального разогрева и размягчения приконтактных слоев металла в местах схватывания. Было проведено конечноэлементное моделирование адиабатического резания. На практике адиабатические условия резания для углеродистых сталей создаются при скоростях обработки порядка 300 м/мин [3].

Расчет выполнен по методике, изложенной в работе [7]. Схватывание задавалось по всей длине зоны контакта резца с металлом. Расчетная картина σ_1 представлена на рис. 4. По сравнению с рис. 1 произошло существенное ослабление напряжений в задней области растяжения (до $\sigma_1 = 270$ МПа).

Кроме того, задняя область отделилась от режущей кромки и в основном отступила в зону чисто упругих деформаций металла. Зона интенсивного пластического течения ограничена штриховой изолинией и состоит из трех пересекающихся зон: стружкообразования (направление AC), приконтактных

деформаций (BC) и обратного пластического течения металла (CD). Деформации сопровождаются интенсивным разогревом металла во всех зонах ($700...800^\circ\text{C}$), что вызывает снижение предела текучести материала на порядок в сравнении с первоначальным σ_T . В итоге приконтактная полоса металла вдоль BC превращается в своеобразный слой смазочного материала, по которому остальные объемы металла сравнительно свободно перемещаются относительно резца. Поэтому тормозящее действие схватывания при высокоскоростном резании в целом слабеет. Об этом свидетельствует соотношение сил резания. Так, для описываемого решения составляющая силы резания вдоль передней поверхности равна 29 Н, т. е. на 81 % меньше, чем при медленном "холодном" резании со схватыванием.

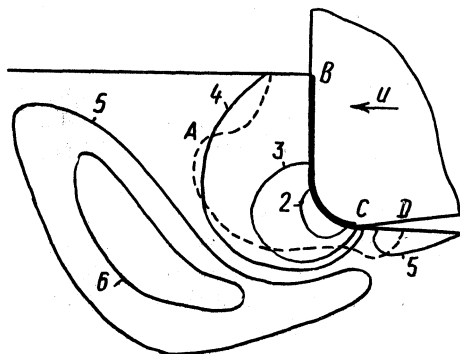


Рис. 4. Изолинии напряжения σ_1 в условиях адиабатического резания с контактным схватыванием (обозначения изолиний — по рис. 1)

Размягчение приконтактных слоев металла в результате локального его разогрева и является, вероятно, основной причиной ослабления задней области растяжения (рис. 4). Существование передней области растяжения также не должно приводить к разрушениям, так как она лежит вне зоны пластического течения. Еще одним благоприятным обстоятельством является высокий уровень сжимающих напряжений в районе режущей кромки ($\sigma_1^{\min} = -980 \text{ МПа}$). Здесь отношение гидростатического напряжения к пределу текучести (степень сжатия) изменяется по сравнению с данными на рис. 1 от $-2,1$ до $-15,6$, т. е. в 7,5 раза. Сопровождение пластической деформации сильным объемным сжатием должно защищать от структурных повреждений металл,ступающий изпод режущей кромки во вновь образуемый поверхностный слой детали.

Таким образом, моделирование с помощью МКЭ подтверждает, что высокоскоростное, приближающееся к адиабатическому, резание металлов обладает большими потенциальными возможностями. Оно способно обеспечить не только повышение производительности обработки, но и более высокий уровень прочностных свойств поверхностного рабочего слоя изготавливаемых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Довнар С.С. Численно-математическая модель для определения напряжений, возникающих при обработке металлов резанием // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. — 1985. — № 2. — С. 10–13. 2. Яценко П.И., Довнар С.С. Напряженно-деформированное состояние зоны стружкообразования в процессе врезания резца в металл // Машиностроение. — Мн.: Выш. шк., 1985. — Вып. 10. — С. 3–6. 3. Бобров В.Ф. Осно-

вы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с. 4. Инженерная теория пластичности / Под ред. В.И. Беляева. – Мн.: Наука и техника, 1985. – 288 с. 5. Ис а е в А.И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием. – М.: Mashgiz, 1950. – 358 с. 6. П у ш к а р е в В.Ф., М е л ь н и к В.А. Вибрационная зачистка среднеуглеродистых, высокоуглеродистых и легированных сталей // КШП. – 1969. – № 2. – С. 46–47. 7. Я щ е р и ц ы н П.И., Д о в н а р С.С. Моделирование температурных полей и напряжений в зоне резания металла // Машиностроение. – Мн.: Выш. шк., 1986. – Вып. 11. – С. 3–7.

УДК 621.9:539.374

В.М. КУЦЕР

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОРТОГОНАЛЬНОГО РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННЫХ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

Существующие модели процесса ортогонального резания, предполагающие наличие идеального жесткопластического тела [1–4 и др.], имеют значительные недостатки: они не учитывают зависимость параметров стружкообразования от переменных свойств обрабатываемого материала и термомеханического режима резания. Попытка учесть сложное реологическое поведение материала в очаге деформации приводит к необходимости введения ряда эмпирических соотношений для важных характеристик процесса [5, 6]. Исследования Н.Н. Зоревы [7] дают точные результаты только для относительно невысоких скоростей резания.

В настоящей работе обосновывается подход к анализу процесса резания, в основе которого лежит учет неидеальных свойств обрабатываемого материала. За основу принято решение, предложенное Х. Кудо [4], Ли и Шаффером [1], с учетом завивания стружки и неравномерности распределения трения на передней поверхности резца.

Рассмотрим некоторые особенности решения [4] для идеально пластичного материала. Поле линий скольжения и соответствующий годограф скоростей приведены на рис. 1, а, б. Если вдоль передней поверхности инструмента задано распределение контактных напряжений

$$\tau_k = \tau_k(x), \quad (1)$$

то углы наклона α -линий скольжения вдоль CE

$$\eta = \frac{1}{2} \arccos(\tau_k/k) \quad (2)$$

(k – пластическая константа материала стружки) и для области BEC может быть решена смешанная краевая задача [8].

Между угловыми координатами поля существуют следующие соотношения:

$$\beta = \eta_E - \eta_C - \alpha; \quad \delta_C = \pi/2 + \eta_C - \gamma, \quad (3)$$

где η_E и η_C – углы, определяемые по формуле (2), соответственно в точках контакта E и C ; γ – угол резания.