

## РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

УДК 621.9.011:517.962.1

С.С. ДОВНАР

### НАКЛЕП ОБРАБАТЫВАЕМОГО РЕЗАНИЕМ МЕТАЛЛА КАК ФАКТОР СТИМУЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ РАЗРУШЕНИЙ

Исследование напряжений и деформаций в металле проводилось путем численно-математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ). При этом использовалась конечноэлементная модель [1], предназначенная для случая ортогонального резания. Расчеты были выполнены при следующих условиях: начальный предел текучести обрабатываемого металла  $\sigma_{Т0} = 750$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , глубина резания  $t = 0,2$  мм, передний угол реза  $\gamma = 0$ , радиус закругления режущей кромки  $\rho = 0,06$  мм. Рассматривался этап врезания при условии, что резец имеет высокоэффективное антифрикционное покрытие, обработка низкоскоростная и поэтому температурные и динамические эффекты не моделируются. Деформационное упрочнение задавалось по степенной зависимости

$$\sigma_T = \sigma_{Т0} + B \epsilon_i^C,$$

где  $\epsilon_i$  — накопленная пластическая деформация в данной точке зоны резания;  $B$  и  $C$  — коэффициенты упрочнения.

Решение, выполненное для идеально пластичного материала [1], показало, что в зоне резания существуют три характерные области напряжений. К режущей кромке примыкает область объемного сжатия, а ниже линии среза располагаются передняя и задняя области растяжения. Последние две области являются местами возможного трещинообразования. Напряженное состояние в зоне резания стабилизируется при очень малом врезании инструмента (порядка  $u = 10$  мкм).

Трудность изучения фактора упрочнения заключается в том, что его действие на процесс резания проявляется медленно. Ходы инструмента  $u = 10$  мкм оказываются уже недостаточно для выявления стабилизировавшегося напряженно-деформированного состояния металла в зоне резания. Так, при коэффициентах упрочнения  $B = 750$  МПа и  $C = 0,8$ , соответствующих темпам наклепа высокоуглеродистых сталей [2], наибольшие главные напряжения  $\sigma_1$  отличались от напряжений, полученных для идеально пластичного решения [1], не более чем на 11%. Это объясняется тем, что из-за небольших перемещений  $u$  предел текучести металла в зоне стружкообразования по расчету повышается только на 15%. В то же время в действительности в ходе резания металл упрочняется в 2–3 раза [3].

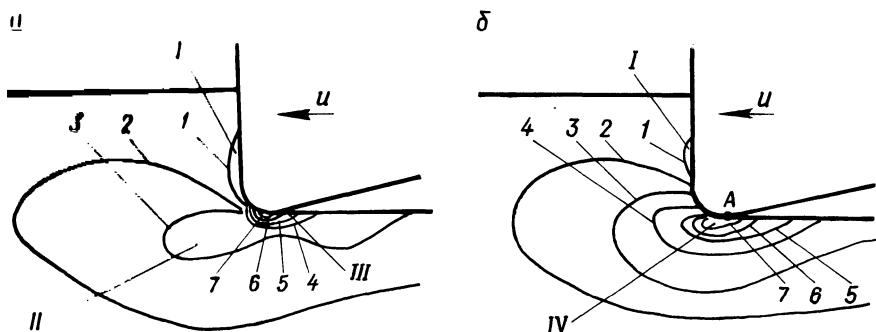


Рис. 1. Изолинии напряжений  $\sigma_1$  :

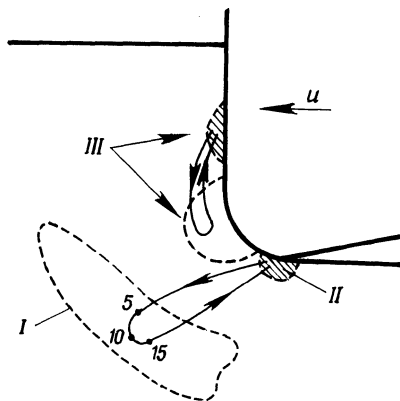
1 – 100 МПа; 2 – 200; 3 – 300; 4 – 500; 5 – 700; 6 – 1100; 7 – 1500 МПа; I – область объемного сжатия; II, III – передняя и задняя области растяжения; IV – вновь образованная единая область растяжения

Роль фактора упрочнения необходимо было выявить, избегая моделирования больших перемещений резца  $u$ , что привело бы к значительной геометрической нелинейности в МКЭ-расчетах. Поэтому пришлось обратиться к приближенному решению. Коэффициент  $B$  был искусственно завышен, что обеспечило в расчетах ускорение наклепа металла при постоянном ходе резца  $u = 10$  мкм. На рис. 1, а, б представлены картины напряжений  $\sigma_1$  в зоне резания упрочняющегося материала соответственно для  $B = 7500$  МПа и  $B = 15000$  МПа. Ориентировочно их можно отнести к перемещениям резца  $u = 100$  мкм и  $u = 200$  мкм при нормальном темпе упрочнения. При  $B = 15000$  МПа предел текучести по зоне стружкообразования повысился в среднем в 2 раза, а возле режущей кромки – до 4 раз. Такие расчетные уровни  $\sigma_T$  уже соответствуют реальным.

По сравнению с базовым решением [1], упрочнение приводит к существенному ослаблению области объемного сжатия I (рис. 1, а, б). Эта область по мере развития наклепа при врезании уменьшается в размерах и перемещается от закругления режущей кромки на переднюю поверхность инструмента. Экстремальные значения  $\sigma_1$  в рассматриваемой области составляют –210 и –170 МПа соответственно для рис. 1, а и б. Таким образом, происходит падение напряжений по абсолютному значению на 79 и 82 % по сравнению с базовым уровнем  $\sigma_1 = -970$  МПа.

Области растяжения по мере развития упрочнения стремятся слиться друг с другом. Точнее, перемещается только передняя область растяжения, которая отходит назад под режущую кромку. Переднюю II и заднюю III области растяжения (рис. 1, а) еще можно различить по изгибам изолинии 3. Однако при  $B = 15000$  МПа (рис. 1, б) их слияние уже завершено и сформирована единая область растяжения IV с центром (точка А) на границе контакта между резцом и вновь образованной поверхностью детали. Процесс упрочнения многократно усилит растягивающие напряжения в зоне резания. Максимальные значения  $\sigma_1$  в МКЭ-расчетах по рис. 1, а, б составляли соответственно 1500 и

Рис. 2. Перемещения области объемного сжатия III и области растяжения I относительно задней II области растяжения в процессе врезания реза в упрочняющийся материал (цифры на траектории ход реза  $u$ , мкм)



2600 МПа, в то время как базовое решение характеризовалось  $\sigma_1 = 570$  МПа для передней и  $\sigma_1 = 680$  МПа для задней областей растяжения.

Рассмотрим последовательность формирования напряженного состояния в упрочняющемся материале во время врезания. Передняя область растяжения и область объемного сжатия перемещаются по петлеобразным траекториям (рис. 2). Картина напряжений  $\sigma_1$ , представленная на рис. 1, б, является принципиально такой же, как и на этапе чисто упругого деформирования обрабатываемого металла. При ходе реза  $u = 0,7$  мкм, когда в зоне резания для данных условий еще не началось пластическое течение, существует единственная область растяжения под режущей кромкой, а область объемного сжатия мала и базируется вблизи передней поверхности реза. Во время перемещения инструмента в диапазоне  $u = 1...3$  мкм передняя область растяжения выдвигается вперед, несколько обгоняя резец. Одновременно область объемного сжатия, расширяясь, захватывает пространство перед закруглением режущей кромки реза. Эта фаза перемещения областей растяжения завершается примерно при  $u = 10$  мкм [1] и практически одинакова как для идеально пластичного, так и для упрочняющегося материалов. Лишь далее развивается действие фактора наклепа и начинается квазиупругий возврат на свои места областей напряжений, как было описано ранее. Эта вторая часть миграционного процесса, более продолжительная, заканчивается, как позволяют оценить МКЭ-расчеты, при ходе инструмента, сопоставимом с толщиной срезаемого слоя.

Деформированное состояние идеально пластичного и упрочняющегося материалов в зоне резания оказалось подобным. Оно характеризуется [4] примерно постоянной интенсивностью деформаций вдоль зоны стружкообразования и концентрацией пластического течения возле режущей кромки, где интенсивность деформаций  $\epsilon_1$  локально повышается в 3–4 раза.

Достоверность МКЭ-расчетов подтверждается при сравнении с известным решением [5], выполненным методом конечных элементов на базе иной модели резания. В упрочняющемся материале также выявлена только одна область растяжения, расположенная под режущей кромкой, как на рис. 1, а.

Влияние фактора упрочнения на напряженно-деформированное состояние материала в зоне резания следует оценить как весьма неблагоприятное для целостности вновь образуемого поверхностного слоя детали. Вероятным местом

развития разрушений является центр единой области растяжения (район точки *A* на рис. 1, б). Зарождение трещин стимулируется по трем причинам.

Во-первых, в 3–4 раза по сравнению с неупрочняющимся материалом повышаются растягивающие напряжения. При этом состоянии объемного растяжения в районе точки *A* дополнительно усиливает вероятность хрупкого разрушения.

Во-вторых, формирование единой области растяжения приводит к концентрации в одном месте всей упругой энергии растяжения зоны резания. Это должно увеличивать масштаб возможных разрушений.

В-третьих, область объемного сжатия, ослабевающая и смещаясь в сторону, перестает защищать зону интенсивных деформаций возле режущей кромки. Поэтому пластическое течение будет проходить в условиях растяжения, что означает ускоренное расходование ресурса пластичности и накопление в металле микрповреждений. Часть дефектного металла из-под режущей кромки попадает во вновь образуемый поверхностный слой изделия и подвергается экстремальному растяжению около точки *A* (рис. 1, б). Если явные макроскопические разрушения при этом не произойдут, то возникшие микротрещины все равно приведут к повреждениям позже, на стадии эксплуатации детали.

Из результатов МКЭ-расчетов следует, что фактор упрочнения должен играть существенную роль в формировании рельефов разрушений на обработанной поверхности, характерных для низких скоростей резания. При донаротных скоростях – это рельеф трещин и вырывов ("муар") [6], при скоростях наростообразования – общеизвестный рельеф наротных гребешков (чешуйчатость).

По-видимому, далеко не сразу теряется отрицательное воздействие фактора упрочнения и при переходе в посленаротный диапазон скоростей. Например, при резании углеродистой стали с  $\sigma_{\text{в}} = 850$  МПа со скоростью  $v = 60$  м/мин в зоне стружкообразования была экспериментально зафиксирована температура не выше 380 °С [7]. Этого явно не достаточно для термического разупрочнения стали и снятия наклепа. Как свидетельствуют электронно-микроскопические исследования [8], микротрещины типичны для деталей из различных металлических материалов, обработанных точением, фрезерованием, строганием.

Защитой от опасного воздействия упрочнения может служить наложение на зону резания высокого гидростатического давления, компенсирующего растягивающие напряжения. Однако пока возможно ограниченное применение этого способа, например при чистовом прошивании рабочих отверстий матриц разделительных штампов [9]. Общим средством блокирования фактора упрочнения является сильный нагрев, обеспечивающий превалирование процессов разупрочнения над наклепом. В первую очередь разогрев необходим для металла под режущей кромкой в зоне интенсивного пластического течения и растягивающих напряжений. Кроме того, разупрочнение желательно вдоль всей зоны стружкообразования для снижения сил резания и уменьшения упругой энергии растяжения. Этим условиям лучше всего отвечает нагрев при пластической деформации. Реализация такого метода нагрева возможна при переходе к высокоскоростному адиабатическому резанию.

Это было подтверждено опытами по ударному скальпированию на механическом копре образцов из стали У10 диаметром 16 мм и длиной 10 мм. Инструмент — режущая матрица с углами  $\alpha = \gamma = 0$ , имеющая антифрикционное покрытие из меди. Глубина резания  $t = 0,1 \dots 0,4$  мм. Диапазон скоростей резания от 190 до 530 м/мин обеспечивает для ультрадистых сталей приближение к адиабатическим условиям обработки [10]. Во всем диапазоне скоростей достигнуто высокое качество поверхности с параметром шероховатости не более 0,06 мкм. Обследование образцов на растровом электронном микроскопе с увеличением до 2000 раз не выявило на них следов поверхностных разрушений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Д о в н а р 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. П о л у х и н П.И., Г у н Г.Я., Г а л к и н А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. — М., 1983. — 352 с.
3. К у ф а р е в Г.Л., О к е н о в К.Б., Г о в о р у х и н В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. — Фрунзе, 1970. — 170 с.
4. Я щ е р и ц ы н П.И., Д о в н а р С.С. Напряженно-деформированное состояние зоны стружкообразования в процессе врезания реза в металл // Машиностроение. — Вып. 10. — С. 3–6.
5. И в а т а, О с а к а д а, Т э р а с а к а. Моделирование процесса ортогонального резания методом конечных элементов для жестко-пластичного тела // Тр. АОИМ. Теоретические основы инженерных расчетов. — 1984. — № 2. — С. 24–31.
6. В е д м е д о в с к и й В.А. Исследование неровностей на обработанной поверхности при резании в условиях образования элементной стружки // Вопр. точности протягивания. — Рига, 1969. — С. 73–92.
7. Справочник по технологии резания материалов. — М., 1985. — Т. 1. — 616 с.
8. B l a c k J.T., R a m a l i n g a m S. Fine Structure of Machined Surfaces // Int. J. of Machine Tool Design and Research. — 1970. — Vol. 10, No 4. — P. 439–463.
9. А.с. 980900 (СССР). Ящерицын П.И., Довнар С.С. Способ чистовой обработки отверстий.
10. Б о б р о в В.Ф. Основы теории резания металлов. — М., 1975. — 344 с.

УДК 621.9:539.374

В.М. КУЦЕР

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИЛ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ РЕЗАНИИ

Определение уровня сил резания по результатам механических испытаний при минимальном количестве экспериментов имеет важное значение для оценки обрабатываемости новых материалов. Н.Н. Зорев получил теоретическую оценку для проекций сил резания при сверхнизких скоростях обработки [1]. Актуальной является задача определения сил при высоких скоростях резания, характерных для большинства видов механической обработки.

В работе [2] предложено решение этой задачи на основе поля линий скольжения Ли–Шаффера (рис. 1) [3], причем пластические свойства обрабатываемого материала описываются зависимостью

$$k = k_0 (1 + A\Gamma^m) F(T), \quad (1)$$