

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВИДА СТРУЖКИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

И.О. Аверьянова, Н.А. Шестаков

ФГБОУ ВПО «МГИУ», г. Москва, Россия

Процесс механической обработки состоит в удалении с поверхности заготовки некоторого слоя, который является отходом в виде стружки. Возникновение при обработке резанием неконтролируемой сливной стружки доставляет серьезные проблемы с ее удалением. Большинство проблем, связанных с удалением стружки из зоны резания снимается в случае элементного стружкообразования.

Целью данной работы является разработка методики прогнозирования необходимых и достаточных условий в зоне резания для образования элементной стружки на основе феноменологической теории деформируемости металлов при обработке металлов давлением.

Для применения феноменологической теории деформируемости необходима информация о локальных характеристиках напряженно-деформированного состояния (НДС). В данной работе получение информации об НДС в пластической зоне при резании производилось в программном комплексе конечно элементного моделирования [DEFORM](#).

Моделирование пластического течения в зоне стружкообразования и последующие экспериментальные работы производились для случая резания латуни Л60 при прямолинейном движения реза. Для построения зависимости напряжения текучести  $\sigma_s$  от степени деформации  $\epsilon_0$  и интенсивности скоростей деформации  $\dot{\epsilon}_u$ , а также температуры  $T$  использованы экспериментальные данные [1], которые аппроксимированы следующей формулой:

$$\sigma_s = A \left( 1 + \frac{\epsilon_0}{B_1} \right)^{m_1} (B_2 + \dot{\epsilon}_u)^{m_2} \cdot e^{-m_3 \cdot T} \cdot e^{-m_4 \cdot \epsilon_0}, \quad (1)$$

где  $A=217,176$ ;  $B_1=0,01$ ;  $B_2=0,008$ ;  $m_1=0,3$ ;  $m_2=0,015$ ;  $m_3=0,002$ ;  $m_4=0,01$  - коэффициенты аппроксимации;  $T$  - температура ( $^{\circ}\text{C}$ );  $e$  - основание натуральных логарифмов.

В результате взаимодействия реза с заготовкой возникают силы трения на контактных поверхностях, которые учитывают путем использования различных законов трения. Для расчетов был принят закон трения Кулона, согласно которому напряжение трения  $\tau_k$  пропорционально нормальному давлению  $\sigma_n$  на контактной поверхности

$$\tau_k = \mu \sigma_n, \quad (2)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения (для расчетов принимался равным 0,1).

Моделирование в DEFORM проводилось в предположении о плоской деформации, что подтверждается экспериментом, когда ширина срезаемого слоя значительно больше его толщины (глубины резания). Экспериментальные работы и моделирование производилось для глубины резания равной 0,15 мм, материал заготовки - упруго пластический с модулем упругости  $E=98000$  МПа, с пределом прочности  $\sigma_b=350$  МПа и  $\sigma_{0,2}=110$  МПа, относительное удлинение  $\delta=0,4$ ; резец - абсолютно жесткий, радиус скругления режущей кромки - 0,02 и 0,05 мм. Передний угол -  $+39^{\circ}$ ,  $+17^{\circ}$ ,  $+8^{\circ}$  и  $-5^{\circ}$ ; скорость подачи - 0,4 мм/с; начальная температура -  $20^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент теплопроводности - 108,8 Вт/м $\cdot$  $^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент теплопередачи в зоне контакта - 40 Н/(с $\cdot$  $^{\circ}\text{C}\cdot$ мм); температура окружающей среды -  $20^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент теплопередачи в окружающую среду (воздух) - 0,4 Н/(с $\cdot$  $^{\circ}\text{C}\cdot$ мм).

На рис. 1 для резания с углом  $+8^{\circ}$  показана лагранжева сетка, иллюстрирующая кинематику течения, и изолинии интенсивности скоростей деформации  $\dot{\epsilon}_u$  (обозначены буквами А, В, С, D, E, F, G, H, I).

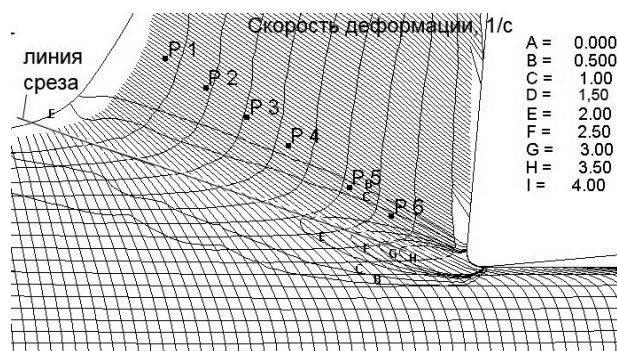


Рис. 1 - Распределение интенсивности скоростей деформации  $\dot{\epsilon}_u$  и движение трассируемых точек в процессе образования стружки при резании с углом  $+8^{\circ}$

Рассчитанные в DEFORM компоненты тензоров - напряжений  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$  здесь и далее), деформаций  $\epsilon_{ij}$ , скоростей деформации  $\xi_{ij}$  и их инвариантов: интенсивности напряжений  $\sigma_u$ , степени и интенсивности скоростей деформации  $\epsilon_0$  и  $\dot{\epsilon}_u$  выводились для заранее выбранных для наблюдения (трассируемых) точек P1, P2, P3, P4, P5, P6 в виде файлов с расширением .xls или .txt, которые для дальнейшей обработки экспортированы в Mathcad, с использованием которого производились дальнейшие расчеты. Трассируемые точки были выбраны до начала резания на следующих расстояниях от свободной поверхности: P1 - на расстоянии 0,01 мм; P2 - 0,03 мм; P3 - 0,05 мм; P4 - 0,07

мм;  $P5 - 0,1$  мм;  $P6 - 0,12$  мм, то есть они охватывают всю глубину срезаемого слоя. Текущее местоположение точек  $P1, P2, P3, P4, P5, P6$  в процессе деформации показано на рис. 1. Изменение НДС в трассируемых точках определяет историю деформации материальных точек в срезаемом слое, необходимую для расчета степени использования запаса пластичности, предшествующего появлению скалывающей трещины в соответствии с теорией деформируемости, развитой в [2, 3, 4].

Расчет степени использования запаса пластичности производился с использованием критериев разрушения В.Л. Колмогорова [2]:

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_0^*} \frac{d\varepsilon_0}{\varepsilon_{pr}(\eta)} = 1, \quad (3)$$

и Г.Д. Деся [4, 5]:

$$\Psi_u = \sqrt{\Psi_{ij} \Psi_{ij}} = 1, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0 = \sqrt{2/3} \cdot \int \sqrt{d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij}} = \int \dot{\varepsilon}_u dt$  – степень деформации;  $d\varepsilon_{ij}$  – приращения компонент девиатора деформации;  $\dot{\varepsilon}_u$  – интенсивность скоростей деформации;  $\varepsilon_0^*$  – степень деформации в конечный момент формоизменения;  $\varepsilon_{pr}(\eta)$  – диаграмма пластичности;  $\eta = 3\sigma/\sigma_u$  – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния;  $\sigma = \sigma_{ii}/3$  – среднее напряжение (гидростатическое давление);  $\sigma_u = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$  – интенсивность напряжений;  $s_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;

$$\Psi_{ij} = \int_0^{\varepsilon_0^*} F(\varepsilon_0, \eta) \beta_{ij} d\varepsilon_0 \quad (5)$$

– компоненты тензора повреждений;  $F(\varepsilon_0, \eta)$  – положительная функция, являющаяся характеристикой материала, которую на основе обобщения экспериментальных данных в работе [4] рекомендуется принять при  $a=0,5$  в виде:

$$F(\varepsilon_0, \eta) = \frac{(1-a)}{\varepsilon_{pr}(\eta)} + \frac{2a\varepsilon_0}{\varepsilon_{pr}^2(\eta)}; \quad (6)$$

$a$  – коэффициент, подбираемый на основании эксперимента;  $\beta_{ij}$  – направляющий тензор скоростей деформации:

$$\beta_{ij} = \sqrt{2/3} \xi_{ij} / \dot{\varepsilon}_u; \quad (7)$$

$\xi_{ij}$  – компоненты тензора скорости деформации.

Критерий (3) применяют в случае, если в процессе деформации  $\eta \approx \text{const}$ , а критерий (4) – когда  $\eta \neq \text{const}$ ,  $\beta_{ij} \neq \text{const}$ .

Еще одна механическая характеристика – диаграмма пластичности на основании данных, приведенных в работе [3], была аппроксимирована зависимостью:

$$\varepsilon_{pr}(\eta) = 0,55e^{-0,318\eta} \quad (8)$$

На рис. 2 показаны пути деформации  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta)$  трассируемых точек. Полученные пути деформации в полной мере отвечают условию  $\eta \neq \text{const}$ ,  $d\eta/d\varepsilon_0 \neq \text{const}$ . Это означает, что предпочтительнее использование критерия (4).

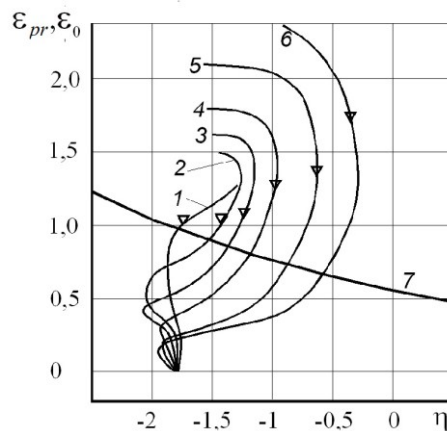


Рис. 2. Пути деформации (кривые 1-6) трассируемых точек  $P1-P6$  и диаграмма пластичности (кривая 7) при резании резцом с передним углом  $+8^\circ$

Зависимости  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta)$ , приведенные на рис. 2 для трассируемых точек  $P1-P6$  показывают, что на всем протяжении процесса отделения стружки напряженное состояние характеризуется всесторонним сжатием. Причем на входе в очаг деформации напряженное состояние для всех точек характеризуется повышением  $\sigma$ . Однако, чем ближе трассируемая

точка к режущей кромке, тем меньшая деформация сопровождается повышением  $\sigma$ , а схема напряженного состояния, становится более «жесткой». Аналогичный характер изменения функции  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta)$  был установлен и для других углов резания. Расчет использованного запаса пластичности производился путем вычисления компонентов тензора повреждений (5) и их меры (4), которые для рассматриваемого случая плоского деформированного состояния принимают вид:

$$\Psi_x = \int_0^{\varepsilon_0^*} \left[ \frac{0,5}{\varepsilon_{pr}(\eta)} + \frac{a\varepsilon_0(\eta)}{\varepsilon_{pr}^2(\eta)} \right] \beta_x d\varepsilon_0, \quad \Psi_y = \int_0^{\varepsilon_0^*} \left[ \frac{0,5}{\varepsilon_{pr}(\eta)} + \frac{a\varepsilon_0(\eta)}{\varepsilon_{pr}^2(\eta)} \right] \beta_y d\varepsilon_0, \quad (9)$$

$$\Psi_{xy} = \int_0^{\varepsilon_0^*} \left[ \frac{0,5}{\varepsilon_{pr}(\eta)} + \frac{a\varepsilon_0(\eta)}{\varepsilon_{pr}^2(\eta)} \right] \beta_{xy} d\varepsilon_0, \quad \Psi_u = \sqrt{\Psi_x^2 + \Psi_y^2 + 2\Psi_{xy}^2}$$

Критерий разрушения во всех случаях резания с углами  $+39^\circ$ ,  $+17^\circ$  и  $+8^\circ$  оказался выполненным. Однако, согласно экспериментальным данным при резании с углами  $+39^\circ$ ,  $+17^\circ$  наблюдалось сливное стружкообразование и только при резании с углом  $+8^\circ$  была получена элементная стружка. Несоответствие расчетных и экспериментальных данных было исключено, когда верхний предел интегрирования в выражениях  $\Psi_{ij}$  был принят равным не  $\varepsilon_0^*$ , а равным степени деформации накопленной в точках P1-P6 к моменту пересечения ими линии соединяющей максимумы интенсивности скоростей деформации. На рис. 1 эта линия обозначена, как линия среза (след плоскости среза), а на рис. 2 момент достижения максимальной скорости деформации обозначен треугольными символами. То есть стружка скалывания начинает образовываться только при угле резания  $+8^\circ$ , когда  $\Psi_u = 1$  на всей линии среза во всех трассируемых точках P1-P6.

Обсуждения требует другой факт. В чем причина того, что, несмотря на достижение предельного состояния на части плоскости среза при резании с углами больше  $+8^\circ$  образуется сливная стружка. Объяснение этому можно найти, анализируя результаты исследований таких процессов обработки давлением, как раздача трубы и гибка узкой полосы на ребро. Отличительной особенностью этих процессов является ярко выраженное влияние градиента деформации. В работе [6] теоретически и экспериментально обоснован механизм сдерживания развития трещины в слоях с предельным значением величины деформации со стороны менее деформированных слоев металла. В указанных процессах механизм сдерживания проявляется в условиях действия растягивающих напряжений

Следует ожидать, что в исследуемом процессе стружкообразования этот механизм проявляется сильнее в связи с тем, что в отличие от упомянутых процессов схема напряженного состояния существенно более «мягкая», а именно: вся область среза находится в условиях всестороннего сжатия, причем значительного. Коэффициент жесткости  $\eta$  достигает значения равного минус 2. Для сравнения - при испытании на одноосное сжатие  $\eta = -1$ . Очевидно, что в условиях всестороннего сжатия объединение микротрещин в макротрещину и ее раскрытие даже в зоне исчерпанного запаса пластичности затруднено.

Таким образом, предложенная методика позволяет производить проектирование режущего инструмента и научно обоснованный выбор режимов резания, обеспечивающие элементное стружкообразование.

#### Список литературы

1. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Спр-к. –М.: Металлургия, 1976. –488 с.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М., Металлургия, -1986, 688 с.
3. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983, 175 с
4. Дель Г.Д. Пластичность деформированного металла // Физика и техника высоких давлений. –1983. –№ 11. –С. 28 – 32.
5. Шестаков Н.А. Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad. Учебное пособие. – М.: МГИУ. – 2008. – 333 с., ил
6. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. Учебник для вузов. –М.: Изд. МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2003. 480 с.: ил.