

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 σ_s от степени деформации ϵ_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 τ_k пропорционально нормальному давлению σ_n на контактной поверхности

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

где μ - 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° ; скорость подачи - 0,4 мм/с; начальная температура - 20°C ; коэффициент теплопроводности - 108,8 Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$; коэффициент теплопередачи в зоне контакта - 40 Н/(с $\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{мм}$); температура окружающей среды - 20°C ; коэффициент теплопередачи в окружающую среду (воздух) - 0,4 Н/(с $\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{мм}$).

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).

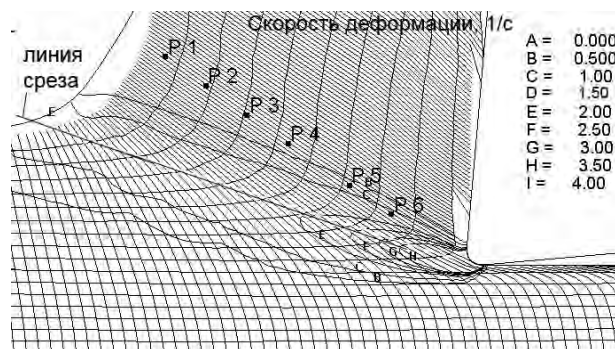


Рис. 1 - Распределение интенсивности скоростей деформации $\dot{\epsilon}_u$ и движение трассируемых точек в процессе образования стружки при резании с углом $+8^{\circ}$

Рассчитанные в DEFORM компоненты тензоров - напряжений σ_{ij} ($i, j = x, y, z$ здесь и далее), деформаций ϵ_{ij} , скоростей деформации ξ_{ij} и их инвариантов: интенсивности напряжений σ_u , степени и интенсивности скоростей деформации ϵ_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; ε_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; β_{ij} – направляющий тензор скоростей деформации:

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

ξ_{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).

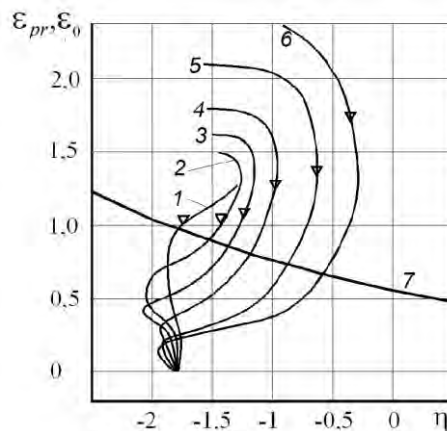


Рис. 2. Пути деформации (кривые 1-6) трассируемых точек $P1-P6$ и диаграмма пластичности (кривая 7) при резании резцом с передним углом $+8^\circ$

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 σ . Однако, чем ближе трассируемая

точка к режущей кромке, тем меньшая деформация сопровождается повышением σ , 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 Ψ_{ij} был принят равным не ε_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 η 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.