

УДК 621.91.01

Аверьянова И. О., Шестаков Н. А.

## ПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

Характер стружкообразования существенно влияет на надежность, стабильность процесса обработки резанием. Статистические исследования показывают, что более 60 % всех случаев вмешательства оператора для текущего поддержания работоспособности металлорежущего оборудования, связано именно со стружкой. Возникновение при обработке резанием неконтролируемой сливной стружки доставляет серьезные проблемы:

- стружка наматывается на элементы технологической системы СПИД;
- стружка вызывает сбои систем автоматического измерения размеров обрабатываемой детали и контроля состояния режущего инструмента;
- стружка царапает обработанную поверхность детали и увеличивает величину шероховатости;
- стружка усложняет функционирование робототехнических загрузочных и прочих вспомогательных устройств.

Успешное решение перечисленных проблем связано с дальнейшим развитием науки о резании металлов. Применение достижений теории пластичности в области прогнозирования предельных состояний деформируемого металла может оказаться одним из перспективных направлений этого развития. На основе феноменологических представлений об условиях разрушения металлов в процессах пластической деформации целесообразно рассмотреть условия образования элементной стружки, которая в большой степени снимает вышеуказанные проблемы.

Основанием для применения теории пластичности служит то, что превращение срезаемого слоя в стружку происходит в пластической зоне. Многие исследователи пытались применять методы теории пластичности для анализа процесса резания. Наибольшее количество исследований выполнено с использованием метода линий скольжения, в рамках которого, к сожалению, может быть использована только идеальная жестко-пластическая модель обрабатываемого материала [1]. Аналогичным недостатком обладает энергетический метод, который применен в работе [2]. В результате получены полезные качественные оценки величин сил резания, усадки стружки, угла резания и др.

В последние годы появились работы, в которых процесс стружкообразования исследован с применением конечно элементного анализа пластического течения обрабатываемого металла [3–5]. В результате уточнены параметры, рассчитанные при помощи приближенных методов, и получены дополнительные данные о полях напряжений и деформаций в зоне стружкообразования, распределении давлений на инструмент, распределении температур в заготовке и инструменте и др.

Однако остается нерешенной задача о предельных параметрах деформации, приводящих к элементному характеру стружкообразования.

Целью данной работы является разработка методики прогнозирования необходимых и достаточных условий в зоне резания для образования элементной стружки.

Основной проблемой, возникающей на данном пути, является понятие разрушения. В настоящее время существуют два подхода к вопросу прогнозирования разрушения:

- подход, основанный на представлениях физики твердого тела;
- подход, основанный на соотношениях механики деформируемого твердого тела.

Физика пластичности и прочности описывает законы движения структурных несовершенств в нагруженном твердом теле, используя методологию теории дефектов, в частности, аппарат теории дислокаций. В рамках рассматриваемого подхода подробно изучены основные механизмы движения дефектов на микромасштабном уровне и даны качественные

интерпретации многих закономерностей макродеформаций и макроразрушения. В то же время, анализ напряженно-деформированного состояния макроскопической системы в целом находится вне возможностей микроскопического подхода теории дефектов.

В данной работе обоснован экспериментально и теоретически вариант подхода к решению проблемы прогнозирования типа стружки на основе феноменологической теории деформируемости металлов, развитой в рамках теории пластичности [6–8]. Теория деформируемости применяется в исследованиях и технологических расчетах процессов обработки металлов давлением для прогнозирования предельных параметров деформации, предшествующих различным технологическим отказам типа трещин, разрывов, т. е. браковочных признаков непосредственно связанных с пластической деформацией.

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 Deform. Расчет степени использования запаса пластичности производился с использованием критериев разрушения В. Л. Колмогорова [6]:

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

В. А. Огородникова [7]:

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_0^*} \left( 1 + a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{d\varepsilon_0} \right) \cdot \frac{\varepsilon_0^{a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{d\varepsilon_0}}}{\left[ \varepsilon_{pr}(\eta) \right]^{1 + a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{d\varepsilon_0}}} d\varepsilon_0 = 1, \quad (2)$$

и Г. Д. Деля [8, 9]:

$$\Psi_u = \sqrt{\Psi_{ij} \Psi_{ij}} = 1. \quad (3)$$

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;

$\varepsilon_0^*$  – накопленная деформация в конечный момент формоизменения;

$\varepsilon_{pr}(\eta)$  – диаграмма пластичности;

$\eta = 3\sigma / \sigma_u$  – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния;

$\sigma = \sigma_{ij} / 3$  – среднее напряжение (гидростатическое давление);

$\sigma_u = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$  – интенсивность напряжений;

$s_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;

$$\Psi_{ij} = \int_0^{\varepsilon_0^*} F(\varepsilon_0, \eta) \beta_{ij} d\varepsilon_0; \quad (4)$$

– компоненты тензора повреждений;  $F(\varepsilon_0, \eta)$  – положительная функция, являющаяся характеристикой материала, которую на основе обобщения экспериментальных данных в работе [8] рекомендуется принять при  $a = 0,5$  в виде:

$$F(\varepsilon_0, \eta) = \frac{(1-a)}{\varepsilon_{pr}(\eta)} + \frac{2a\varepsilon_0}{\varepsilon_{pr}^2(\eta)}; \tag{5}$$

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

$$\beta_{ij} = \sqrt{2/3} \xi_{ij} / \dot{\varepsilon}_u; \tag{6}$$

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

Критерий (1) применяют в случае, если в процессе деформации  $\eta \approx const$ , критерий (2) при  $\eta \neq const$ , а критерий (3) – когда  $\eta \neq const, \beta_{ij} \neq const$ .

Расчеты использованного запаса пластичности производились для процесса строгания заготовки из латуни Л60. Выбор материала связан с возможностью сравнения расчетных и экспериментальных данных, приведенных для этой марки материала в работе [9]. Для построения зависимости напряжения текучести от степени и скорости деформации, а также температуры использованы данные [10], которые аппроксимированы следующей зависимостью:

$$\sigma_s = A \left( 1 + \frac{\varepsilon_0}{B_1} \right)^{m_1} (B_2 + \dot{\varepsilon}_u)^{m_2} \cdot e^{-m_3 \cdot T} \cdot e^{-m_4 \cdot \varepsilon_0}, \tag{7}$$

где  $A = 217,176; B_1 = 0,01; B_2 = 0,008; m_1 = 0,3; m_2 = 0,015; m_3 = 0,002; m_4 = 0,01$ .

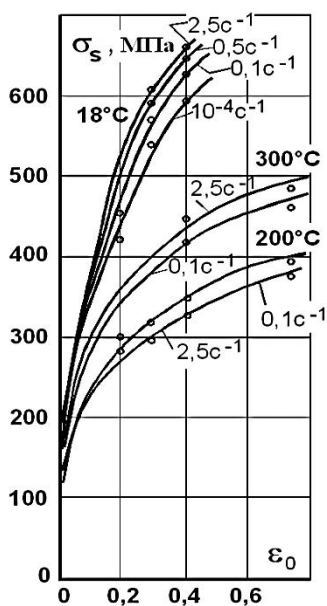


Рис. 1. Кривые упрочнения латуни Л60 для различных температур и скоростей деформации [10] (точками показаны экспериментальные данные)

Результаты сопоставления расчетных по формуле (7) и экспериментальных данных [10] приведены на рис. 1. Резание представляет собой процесс взаимодействия резца с заготовкой с образованием новой поверхности в результате отделения стружки. В результате взаимодействия 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:

$$\tau_k = \mu \sigma_n, \tag{8}$$

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

Еще одна механическая характеристика – диаграмма пластичности на основании данных, приведенных в работе [7], была аппроксимирована зависимостью:

$$\varepsilon_{pr}(\eta) = 0,55e^{-0,318\eta}. \tag{9}$$

Моделирование в Deform проводилось в предположении о плоской деформации, что подтверждается экспериментом. Приняты размеры заготовки: длина – 50 мм, высота – 5 мм, ширина – 1 мм, глубина резания – 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 при разрыве  $\delta = 0,4$ ; резец – абсолютно жесткий, радиус округления режущей кромки – 0,02 и 0,05 мм;

коэффициент трения – 0,1. 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 –  $108,8 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплопередачи в зоне контакта –  $40 \text{ Н/(с}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{мм)}$ ; температура окружающей среды –  $20^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплопередачи в окружающую среду (воздух) –  $0,4 \text{ Н/(с}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{мм)}$ . Для примера на рис. 2 показан результат моделирования процесса резания с углом  $+8^\circ$ . Рассчитанные в Deform компоненты тензоров  $\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\xi_{ij}$  и их инвариантов  $\sigma_u$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\dot{\varepsilon}_u$  выводились в виде файлов с расширением .xls или .txt, которые для дальнейшей обработки экспортированы в Mathcad, с использованием которого производились дальнейшие расчеты.

Расчет использованного запаса пластичности производился в заранее выбранных трассируемых точках расположенных 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. 2. На рис. 3 показаны пути деформирования  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta)$  трассируемых точек. Во-первых, необходимо отметить, что полученные пути деформирования в полной мере отвечают условию  $\eta \neq \text{const}$ ,  $d\eta/d\varepsilon_0 \neq \text{const}$ , Это означает, что предпочтительнее использование критериев (2) и (3). Для того, чтобы определиться окончательно с критерием для последующих расчетов был произведен расчет компонентов направляющего тензора скоростей деформации  $\beta_{ij}$ , которые для рассматриваемого случая плоской деформации принимают вид:

$$\beta_x = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\xi_x}{\dot{\varepsilon}_u}, \quad \beta_y = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\xi_y}{\dot{\varepsilon}_u}, \quad \beta_{xy} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\xi_{xy}}{\dot{\varepsilon}_u}. \quad (10)$$

Графики зависимости  $\beta_x$  и  $\beta_y$  от  $\beta_{xy}$  приведены на рис. 4. Откуда следует, что  $\beta_{ij} \neq \text{const}$ . Поэтому дальнейшие расчеты производились по критерию (3).

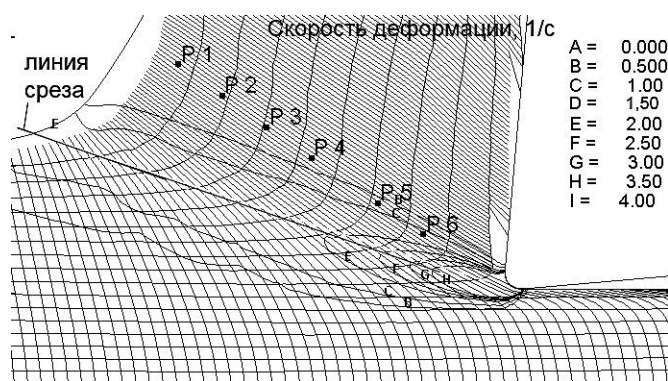


Рис. 2. Распределение интенсивности скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}_u$  и движение трассируемых точек в процессе образования стружки при резании с углом  $8^\circ$

Зависимости  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta)$ , приведенные на рис. 3 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 гидростатического давления. Однако, чем ближе трассируемая точка к режущей кромке тем меньшая деформация сопровождается повышением гидростатического давления. Только в точке P1 схема напряженного состояния на всем пути деформации «мягче», чем в момент окончания деформации. Чем ближе точки к режущей кромке, тем

интенсивнее падение гидростатического давления, т. е. схема напряженного состояния, становится более «жесткой». Такой же характер изменения функции  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta)$  для аналогичных трассируемых точек был установлен и для резания с углами  $+17^\circ$  и  $+39^\circ$

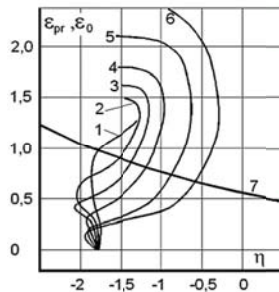


Рис. 3. Пути деформации (кривые 1–6) трассируемых точек P1–P6 и диаграмма пластичности (кривая 7) при резании резцом с передним углом  $+8^\circ$

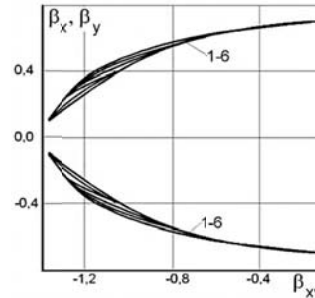


Рис. 4. Зависимость линейных компонент направляющего тензора деформации  $\beta_x$  и  $\beta_y$  от сдвиговой компоненты  $\beta_{xy}$

Расчет использованного запаса пластичности производился путем вычисления интегралов (4) и их меры (3), которые для рассматриваемого случая плоского деформированного состояния принимают вид:

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

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

Расчет привел к противоречию с экспериментальными результатами. Критерий разрушения при таком способе расчета 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. Противоречие было исключено, когда верхний предел интегрирования в выражениях  $\Psi_{ij}$  был принят равным не  $\varepsilon_0^*$ , а равным деформации накопленной к моменту пересечения линии соединяющей максимумы интенсивности скоростей деформации. На рис. 2 эта линия обозначена, как линия среза (след плоскости среза), а на рис. 5 показаны графики зависимости  $\dot{\varepsilon}_u$  от хода резца для трассируемых точек. Точки, соответствующие максимумам на рис. 5 лежат на линии среза показанной на рис. 2. Пути деформирования трассируемых точек до плоскости среза при резании с углом  $8^\circ$  показаны на рис. 6, а результаты расчета величины  $\Psi_u$  для резания с углами  $8^\circ$ ,  $17^\circ$  и  $39^\circ$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета  $\Psi_u$  при различных углах резания

Поврежденность	Угол резца	Номер точки					
		1	2	3	4	5	6
$\Psi_u$	$39^\circ$	0,364	0,415	0,492	0,61	0,75	0,9
$\Psi_u$	$17^\circ$	0,534	0,691	0,973	1,14	1,628	2,486
$\Psi_u$	$8^\circ$	1,016	1,048	1,054	1,458	1,833	2,525

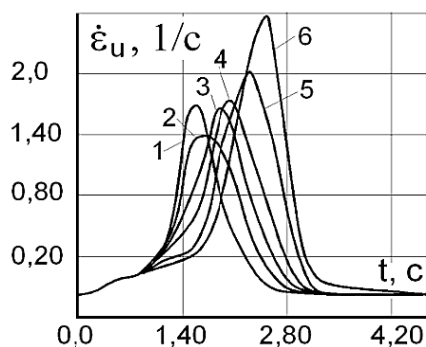


Рис. 5. Зависимость интенсивности скоростей деформации  $\dot{\epsilon}_u$  от времени (хода) резца с углом  $+8^\circ$

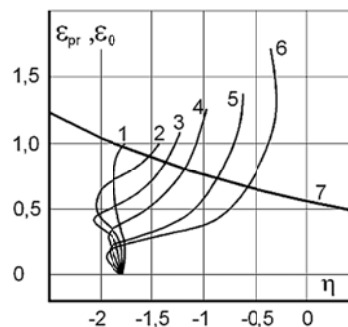


Рис. 6. Пути деформации (кривые 1–6) трассируемых точек P1–P6 до момента достижения области максимальных скоростей деформации (до плоскости среза) при резании резцом с передним углом  $+8^\circ$  и диаграмма пластичности (кривая 7)

По данным табл. 1 величина  $\Psi_u$  при резании с углом  $39^\circ$  ни в одной из трассируемых точек не достигает единицы, а при резании с углом  $17^\circ$  достигает единицы в 4, 5 и 6 точках, однако, как показывают эксперименты, при резании с углом  $17^\circ$  образуется сливная стружка. Стружка скалывания начинает образовываться только при угле резания  $8^\circ$ , когда  $\Psi_u$  достигает единицы на всем протяжении линии среза. Область максимальных скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}_{u(\max)}$  и графики  $\dot{\epsilon}_{u(\max)} = f(t)$  для резания с углом  $8^\circ$  приведены соответственно на рис. 2 и 5.

Анализ показывает, что  $\Psi_u$  достигает единицы позднее при всех углах резания, в точках, примыкающих к свободной поверхности удаленной от режущей кромки (точки P1). Это обстоятельство в дальнейшем может быть использовано для сокращения расчетов, так как после достижения предельного состояния в точке P1, в остальных точках линии среза в направлении режущей кромки также гарантировано предельное состояние.

Обсуждения требует другой факт. В чем причина того, что, несмотря на достижение предельного состояния практически на половине плоскости среза при резании с углом  $17^\circ$  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 [7, 12], в которых теоретически и экспериментально обоснован механизм сдерживания развития трещины в слоях с предельным уровнем развития 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  $-2$ . 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.

Подводя итог проведенному исследованию стружкообразования, сформулируем основные этапы реализации методики прогнозирования элементной стружки:

1. Экспериментальное определение материальных функций, определяющих пластическое течение обрабатываемого материала, включающих в себя механические и теплофизические свойства обрабатываемого материала на основе стандартных испытаний.

2. Экспериментальное определение диаграммы пластичности, характеризующей зависимость пластичности от схемы напряженного состояния.

3. Создание геометрии режущего инструмента.
4. Задание режимов изменения скорости и глубины резания
5. Задание закона трения в зоне стружкообразования
6. Конечно-элементное моделирование пластического течения металла с целью определения полей напряжений, деформаций, скоростей деформации и температуры в зоне стружкообразования.
7. Расчет поврежденности (степени использования запаса пластичности) в зоне стружкообразования.
8. Анализ результатов расчета поврежденности в зоне стружкообразования с целью определения необходимости корректировки геометрии режущего инструмента или режимов резания согласно пп. 3, 4. Корректировка геометрии режущего инструмента или режимов резания требуется в том случае, если в результате расчета поврежденности не установлены условия образования элементной стружки. В этом случае производится новый расчет согласно пп. 6 и 7. Если в результате расчета поврежденности установлено выполнение условия образования элементной стружки, то расчет окончен.

### ВЫВОДЫ

Изложена методика прогнозирования появления трещин скалывания при резании. Появление трещин скалывания приводит в соответствии с экспериментальными данными к образованию элементной стружки. Методика позволяет установить влияние геометрии режущего инструмента, условий трения, радиуса затупления режущей кромки на появление трещин скалывания в срезаемом слое металла. Новая методика прогнозирования элементного стружкообразования позволяет производить проектирование режущего инструмента на основе научно обоснованного подхода и существенно сократить число производственно-технологических проб.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушин С. И. Стружкообразование с развитой зоной пластических деформаций при резании материалов / С. И. Петрушин, А. В. Проскоков // Изв. Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 2. – С. 57–62.
2. Воронцов А. Л. Теоретические основы деформированного состояния поверхностного слоя и параметра точности деталей машин при изготовлении резанием / А. Л. Воронцов, Н. М. Султан-Задэ // СТИН. – 2010. – № 3. – С. 31–36.
3. Виноградов Ю. В. Моделирование процесса резания металла методом конечных элементов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Ю. В. Виноградов. – Тула, 2004. – 119 с.
4. Залого В. А. О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резания методом конечных элементов / В. А. Залого, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик // Вісник СумДУ. – 2006. – № 12 (96). – С. 101–114.
5. Криворучко Д. В. Основи 3d-модельовання процесів механічної обробки методом скінченних елементів : навчальний посібник. / Д. В. Криворучко, В. О. Залого, В. Г. Корбач. – Суми : «Видавництво СумДУ», 2009. – 209 с.
6. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
7. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 175 с.
8. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла / Г. Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 11. – С. 28–32.
9. Шестаков Н. А. Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad (решение задач энергетическим методом) : учебное пособие / Н. А. Шестаков. – М. : МГИУ, 2007. – 333 с., ил.
10. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
11. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1976. – 488 с.
12. Попов Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки : учебник для вузов / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2003. – 480 с. : ил.