

ISSN 0042-4633



ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



2/2013

УДК 621.91.01

И. О. АВЕРЬЯНОВА, канд. техн. наук, Н. А. ШЕСТАКОВ, д-р техн. наук
(Московский государственный индустриальный университет),
e-mail: inn-av@yandex.ru

Анализ процесса стружкообразования при резании

Получены результаты конечно элементного моделирования пластического течения металла при резании, на основе которых с использованием теории деформируемости металлов при пластической деформации предложена методика прогнозирования образования элементной стружки.

Ключевые слова: резание, конечно элементное моделирование, стружкообразование, элементная стружка.

Forecasting procedure of getting discontinuous chip based on metal compliance theory under plastic flow was developed.

Keywords: cutting, modeling by finite element method, chip formation, discontinuous chip.

При обработке заготовок на металлорежущих станках (МРС) образуется стружка. Для обеспечения высокого качества обработки необходимо, чтобы элементы стружки были короткими и легко убирались из зоны резания, что особенно важно при работе на многоцелевых станках с ЧПУ. В автоматизированном производстве для этого уже на этапе подготовки управляющих программ, задавая режимы обработки, необходимо прогнозировать вид стружки.

Сегодня совершенствование обработки резанием связано с исследованием предельного состояния деформируемого металла на основе теории пластичности. Исходя из условий разрушения металла в результате пластической деформации, рассмотрим условия образования элементной стружки. Основанием для применения теории пластичности является то, что срезаемый при обработке слой переходит в стружку в пластической зоне. Для анализа процесса резания многие исследователи применяли методы теории пластичности, используя в основном метод линий скольжения, который подходит только для идеальной жесткопластической

модели обрабатываемого материала [1]. Аналогичный недостаток есть и у энергетического метода [2]. Наиболее подробным остается анализ решений с использованием жесткопластической модели, представленных в работе [3], где сделан вывод о том, что данные решения для сил резания можно рассматривать лишь в качестве первого приближения.

В последнее время опубликованы работы, в которых процесс образования стружки исследован с использованием конечно элементного анализа пластического течения обрабатываемого металла [4–6], что позволило уточнить параметры резания, полученные приближенными методами, и получить дополнительные данные о напряжениях и деформациях в зоне стружкообразования, распределении нагрузок на инструмент, а также температур в заготовке и инструменте. Однако остается нерешенной задача о предельных деформациях в зоне резания, предшествующих разрушению срезаемого слоя и приводящих к образованию элементной стружки. К прогнозированию предельных деформаций применяют два подхода: на осно-

ве теории дефектов физики твердого тела и на основе механики деформируемого твердого тела.

Физическую теорию пластичности кристаллов используют лишь для объяснения и описания элементарных актов деформации на микроуровне. Механика деформируемого твердого тела предусматривает применение аналитических выражений, обеспечивающих прогноз поведения реальных макроскопических объектов. Теорию дефектов в моделях механики деформируемого твердого тела не используют. Однако механизм зарождения и взаимодействия дефектов на микроуровне в рамках физической теории позволил получить качественные интерпретации многих законов макродеформаций и макроразрушений, на основе которых, в частности, была разработана феноменологическая теория деформируемости металлов Колмогорова [7]. Теория деформируемости позволяет решить задачи, связанные с обработкой давлением, путем прогнозирования предельных деформаций, предшествующих различным технологическим отказам (трещины, разрывы), которые непосредственно связаны с пластической деформацией.

Была поставлена задача — разработать методику прогнозирования условий, необходимых и достаточных для образования элементной стружки при резании, на основе феноменологической теории деформируемости. Для этого необходима информация о локальных напряженно-деформированных состояниях (НДС), в данном случае — в пластической зоне резания. Необходимые данные получали с помощью программного комплекса конечно элементного моделирования DEFORM.

Моделирование пластического течения в зоне стружкообразо-

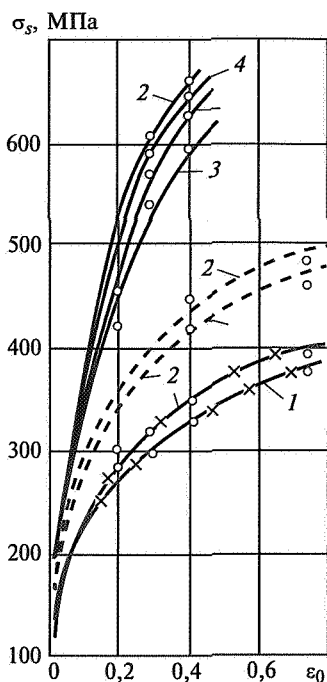


Рис. 1. Кривые упрочнения латуни Л60 для температур $T = 18$ (—); 200 (— $\times$ —); 300 °C (---) и скоростей деформаций $\dot{\epsilon} = 0,1$ (1); $2,5$ (2); 10^{-4} (3); $0,5 \text{ с}^{-1}$ (4) (точки — экспериментальные данные)

вания выполняли для резания латуни Л60 при прямолинейном движении резца. Для получения зависимости напряжения текучести σ_s от степени деформации ϵ_0 , интенсивности скоростей деформации $\dot{\epsilon}_n$ и температуры T использовали экспериментальные данные [8], которые аппроксимировали выражением

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

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.

Результаты сопоставления расчетных по формуле (1) и экспериментальных данных [8] приведены на рис. 1. При резании в результате отделения стружки резец взаимодействует с заготовкой с образованием новой поверхности. При этом на контактных поверхностях возникают силы тре-

ния, которые необходимо учитывать в расчетах. В данном случае был принят закон трения Кулона, согласно которому напряжение трения τ_k пропорционально нормальному напряжению σ_n на контактной поверхности: $\tau_k = \mu \sigma_n$, где $\mu = 0,1$ — коэффициент трения.

Моделирование в DEFORM выполняли в предположении о плоской деформации (что подтвердили эксперименты), при которой ширина срезаемого слоя значительно больше его толщины (глубины резания). Условия и режимы резания: материал заготовки — упругопластический; модуль упругости $E = 98\,000$ МПа; пределы прочности $\sigma_B = 350$ МПа и $\sigma_{0,2} = 110$ МПа; относительное удлинение при разрыве $\delta = 0,4$; резец — абсолютно жесткий; радиусы скругления режущей кромки $\rho = 0,02$ и $0,05$ мм; коэффициент трения $\mu = 0,1$; передний угол резания $\gamma = 39; 17; 8$ и -5° ; глубина резания $t = 0,15$ мм; подача $0,4$ мм/с; начальная температура 20 °C; коэффициент теплопроводности $108,8$ Вт/(м·°C); коэффициент теплопередачи в зоне контакта 40 Н/(с·°C·мм); температура окружающей среды 20 °C; коэффициент теплопередачи в окружающую среду (воздух) $0,4$ Н/(с·°C·мм).

На рис. 2 приведена лагранжевая сетка при $\gamma = 8^\circ$. О кинемати-

ке течения можно судить по изолиниям ($A, B, C, D, E, F, G, H, I$) интенсивности деформации $\dot{\epsilon}_n$.

Рассчитанные в DEFORM компоненты тензоров — напряжений σ_{ij} ($i, j = x, y, z$ здесь и далее), деформаций ϵ_{ij} , скоростей деформации $\dot{\epsilon}_{ij}$ и их инвариантов: интенсивности напряжений σ_n , степени деформации ϵ_0 и интенсивности скоростей деформации $\dot{\epsilon}_n$ определяли из расчетов, выполненных для трассируемых (выбранных) точек P_1 — P_6 в виде файлов с расширением .xls или .txt, которые для дальнейшей обработки были экспортированы в Mathcad. Трассируемые точки выбраны до начала резания на следующих расстояниях от свободной поверхности: P_1 — на расстоянии $0,01$ мм; P_2 — $0,03$ мм; P_3 — $0,05$ мм; P_4 — $0,07$ мм; P_5 — $0,1$ мм; P_6 — $0,12$ мм, т. е. они охватывают срезаемый слой по всей глубине. Текущее местоположение точек P_1 — P_6 при деформации показано на рис. 2. Изменение НДС в трассируемых точках определяет их историю деформации в срезаемом слое, что необходимо для определения степени использования запаса пластичности, предшествующего появлению скалывающей трещины в соответствии с теорией деформируемости.

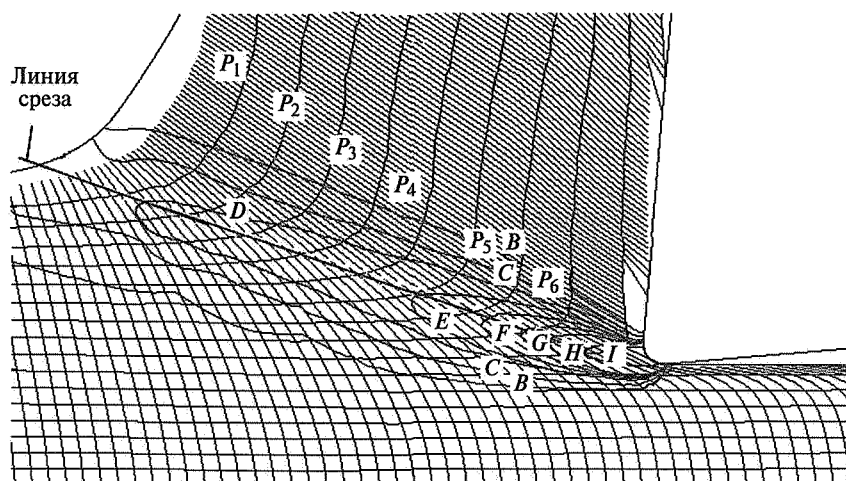


Рис. 2. Распределение интенсивности скоростей деформаций ($A = 0$; $B = 0,5$; $C = 1$; $D = 1,5$; $E = 2$; $F = 2,5$; $G = 3$; $H = 3,5$; $I = 4 \text{ с}^{-1}$) и движение трассируемых точек P_1 — P_6 в процессе образования стружки при $\gamma = 8^\circ$

Расчет использования запаса пластичности выполняли по критериям разрушения:

В. Л. Колмогорова [7]:

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_0^*} \frac{d\varepsilon_0}{\varepsilon_{pr}(\eta)} = 1; \quad (2)$$

В. А. Огородникова [9]:

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_0^*} \left(1 + a \arctg \frac{d\eta}{d\varepsilon_0} \right) \times \frac{\varepsilon_0}{1 + a \arctg \frac{d\eta}{d\varepsilon_0}} d\varepsilon_0 = 1; \quad (3)$$

$$[\varepsilon_{pr}(\eta)]$$

Г. Д. Деля [10, 11]:

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

Здесь $\varepsilon_0 = \sqrt{2/3} \int \sqrt{d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij}} = \int \dot{\varepsilon}_i dt$, где $d\varepsilon_{ij}$ — приращения компонент девиатора деформации; ε_0^* — деформация в конечный момент формоизменения; $\varepsilon_{pr}(\eta)$ — диаграмма пластичности, где $\eta = 3\sigma/\sigma_{ii}$ — коэффициент жесткости схемы напряженного состояния [$\sigma = \sigma_{ii}/3$ — среднее напряжение (гидростатическое давление); $\sigma_{ii} = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$, s_{ij} — компоненты девиатора напряжений]; Ψ_{ij} — компоненты тензора повреждений:

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

В выражении (5) $F(\varepsilon_0, \eta)$ — положительная функция, характеризующая материал, которую в работе [11] рекомендуется принять при коэффициенте $a = 0,5$ (подбирается экспериментально) в виде:

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

$\beta = \sqrt{2/3} \dot{\xi}_{ij}/\dot{\varepsilon}_{ii}$ — направляющий тензор скоростей деформации ($\dot{\xi}_{ij}$ — компоненты тензора скорости деформации).

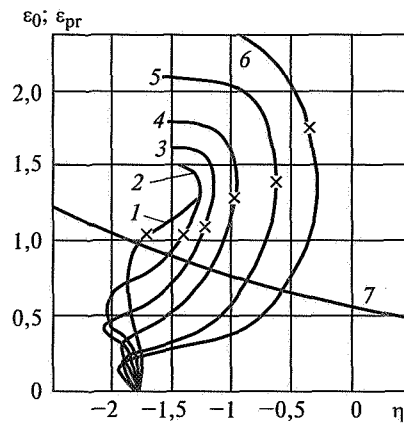


Рис. 3. Пути (1–6) деформаций трассируемых точек P_1 – P_6 и диаграмма $\varepsilon_{pr}(\eta)$ пластичности (7) при $\gamma = 8^\circ$

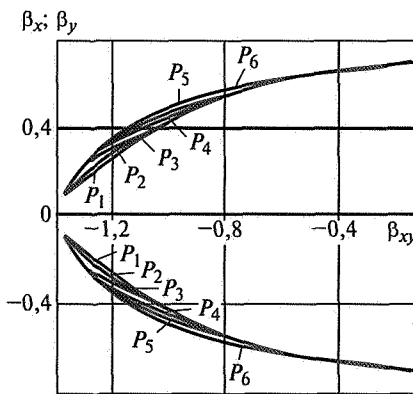


Рис. 4. Зависимости изменения линейных компонент β_x и β_y направляющего тензора деформаций от сдвиговой компоненты β_{xy}

Критерий (2) применяют, если в процессе деформации $\eta \approx \text{const}$, критерий (3) — при $\eta \neq \text{const}$, критерий (4) — если $\eta \neq \text{const}$, $\beta_{ij} \neq \text{const}$.

Еще одна механическая характеристика — диаграмма пластичности на основании данных, приведенных в работе [9], была аппроксимирована зависимостью $\varepsilon_{pr}(\eta) = 0,55e^{-0,318\eta}$.

На рис. 3 показаны пути деформации трассируемых точек, которые отвечают условию $\eta \neq \text{const}$, $d\eta/d\varepsilon_0 \neq \text{const}$. Это означает, что предпочтительнее использование критериев (3) и (4). Для того чтобы окончательно определиться с критерием, выполнили расчет компонент направляющего тензора скоростей деформации для

плоской деформации: $\beta_x = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\dot{\xi}_x}{\dot{\varepsilon}_{ii}}$;

$$\beta_y = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\dot{\xi}_y}{\dot{\varepsilon}_{ii}}; \beta_{xy} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\dot{\xi}_{xy}}{\dot{\varepsilon}_{ii}}.$$

На рис. 4 приведены зависимости изменения линейных компонент β_x и β_y направляющего тензора деформации от сдвиговой компоненты β_{xy} , анализ которых показал, что $\beta_{ij} \neq \text{const}$. Поэтому дальнейшие расчеты выполняли по критерию (4).

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показал, что на протяжении всего процесса отделения стружки напряженное состояние определяется 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 и все большая деформация протекает в условиях понижающегося гидростатического давления. Чем ближе точки к режущей кромке, тем интенсивнее падение гидростатического давления, т. е. напряженное состояние более "жесткое", что наблюдалось и при $\gamma = 17$ и 39° .

Использованный запас пластичности определяли вычислением компонент тензора повреждений [см. выражения (5) и (4)], которые для плоского деформированного состояния имеют вид:

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

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

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

$$\Psi_{ii} = \sqrt{\Psi_x^2 + \Psi_y^2 + 2\Psi_{xy}^2}.$$

Во всех случаях резания ($\gamma = 39, 17$ и 8°) выполнялся критерий разрушения. Однако согласно экспериментальным данным при $\gamma = 39$ и 17° образовывалась сливная стружка и только при $\gamma = 8^\circ$ получалась элементная стружка. Несоответствие расчетных и экспериментальных данных исключалось, если верхний предел интегрирования в выражениях Ψ_{ij} принимали равным не ε_0^* , а деформации, накопленной в точках P_1 — P_6 к моменту пересечения ими линии, соединяющей максимальные интенсивности скоростей деформации. Геометрическое место точек, соответствующих максимальным значениям интенсивности скоростей деформации, назовем линией среза (см. рис. 2).

На рис. 5 показаны зависимости интенсивности скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_i$ в текущем времени (ход резца) для точек P_1 — P_6 . Максимальные значения интенсивности скоростей деформации достигаются при пересечении ими линии среза (на рис. 3 эти моменты при $\gamma = 8^\circ$ для точек P_1 — P_6 показаны знаком "x"). Результаты расчета Ψ_{ij} при $\gamma = 8; 17$ и 39° приведены в таблице.

Ни в одной из трассируемых точек при $\gamma = 39^\circ$ величина Ψ_{ij} при пересечении линии среза не достигает единицы, а при $\gamma = 17^\circ$ в точках P_4 — P_6 имеем $\Psi_{ij} = 1$, однако, как показали эксперименты, в данном случае при резании образуется сливная стружка. Стружка скалывания была получена только при $\gamma = 8^\circ$, когда $\Psi_{ij} = 1$ на линии среза во всех трассируемых точках.

Величина Ψ_{ij} достигает единицы позднее при всех значениях γ в точке, примыкающей к свободной поверхности, удаленной от режущей кромки (точка P_1). Это в дальнейшем можно использовать для уменьшения времени расчетов, так как при достижении предельного состояния в точке P_1 в остальных точках линии среза в направлении режущей кромки

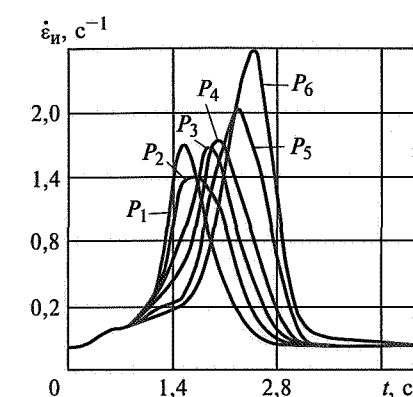


Рис. 5. Зависимость интенсивности скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_i$ от времени t (хода) резца при $\gamma = 8^\circ$

предельное состояние гарантировано.

Как же объясняется то, что несмотря на достижение предельного состояния практически на половине плоскости среза при $\gamma = 17^\circ$ образуется сливная стружка. Проанализируем результаты исследований таких процессов обработки давлением, как раздача трубы и гибка узкой полосы на ребро, которые отличаются значительным влиянием градиента деформации [9, 12]. Здесь теоретически и экспериментально обоснован механизм сдерживания развития трещины в слоях с предельной деформацией со стороны менее деформированных слоев.

Предположим, что в стружкообразовании этот механизм проявляется сильнее, так как в отличие от исследуемых процессов напряженное состояние существенно "мягче", т. е. вся зона среза находится в условиях всестороннего сжатия, причем значительного — коэффициент жесткости

$\eta = -2$ (для сравнения: при испытании на одноосное сжатие $\eta = -1$). Очевидно, что в условиях всестороннего сжатия затруднены объединение микротрещин в макротрещину и ее раскрытие даже в зоне истощенного запаса пластичности.

Последовательность методики прогнозирования элементной стружки:

1) экспериментальное определение показателей механических и теплофизических свойств обрабатываемого материала;

2) экспериментальное определение диаграммы пластичности — зависимости пластичности от схемы напряженного состояния;

3) разработка геометрии режущего инструмента;

4) задание режимов: скорости и глубины резания;

5) задание закона трения в зоне стружкообразования;

6) конечно элементное моделирование пластического течения металла для определения полей напряжений, деформаций, скоростей деформации и температуры в зоне стружкообразования;

7) расчет поврежденности (использованного запаса пластичности) в зоне стружкообразования;

8) анализ результатов расчета поврежденности в зоне стружкообразования для определения необходимости корректировки геометрии режущего инструмента или режимов резания согласно пп. 3, 4. Корректировка геометрии режущего инструмента или режимов резания требуется, если в результате расчета поврежденности не установлены условия образования элементной стружки.

Расчетная поврежденность Ψ_{ij} при различных углах резания

Передний угол резания, градусы	Трассируемые точки					
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
39	0,364	0,415	0,492	0,610	0,750	0,900
17	0,534	0,691	0,973	1,140	1,628	2,486
8	1,016	1,048	1,054	1,458	1,833	2,525

Устойчивость процесса резания

Представлен новый подход к вопросу устойчивости процесса резания, который позволил найти новые решения в повышении качества обработанной поверхности и определении динамических характеристик технологического оборудования.

Ключевые слова: резание, качество, устойчивость процесса, инструмент, траектория, динамические характеристики.

A new slant on the question of cutting operation stability which allowed to find new decisions for upgrading machined face and for determining dynamic characteristics of processing equipment was posed.

Keywords: cutting, quality, operation stability, tool, contour, dynamic characteristics.

Констатируя потерю устойчивости при резании, предполагаем, что до этого момента процесс был устойчив, что не соответствует математическому понятию устойчивости объекта, описываемого системой дифференциаль-

ных уравнений [1]. Если в исходном положении вершина резца находилась в устойчивом положении, поскольку при любых начальных условиях она туда возвращалась, то при резании вершина резца занимает новое по-

ложение под действием внешних сил, возникающих в результате взаимодействия режущего инструмента (РИ) с обрабатываемым материалом, стружкой и заготовкой. Стабильность нового положения вершины РИ и определяет точность обработки и качество получаемой поверхности. Эта стабильность обуславливается динамическими характеристиками технологической системы и стационарностью действующих внешних сил, которые имеют сложные взаимосвязи [2]. Малейшие нарушения стабильности силового воздействия приводят к вариациям положения вершины, что обуславливает ее стремление к изначальной устойчивой позиции.

Стабильность силового воздействия в процессе разрушения материала — понятие во многом



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 74)

ки. В этом случае производится новый расчет согласно пп. 6 и 7. Если в результате расчета повреждения установлено выполнение условия образования элементной стружки, то расчет окончен.

Таким образом, на основании феноменологической теории деформируемости металла разработана методика прогнозирования появления трещин скалывания при резании, приводящих к образованию элементной стружки. Данная методика позволяет проектировать режущий инструмент и определять режимы резания, обеспечивающие образование элементной стружки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Петрушин С. И., Проскоков А. В. Стружкообразование с развитой зоной пластических деформаций при резании материалов // Изв. Томск-

го политехнического ун-та. Т. 314. 2009. № 2. С. 57—62.

2. Воронцов А. Л., Султан-Задэ Н. М. Теоретические основы деформированного состояния поверхностного слоя и параметры точности деталей машин при изготовлении резанием // СТИН. 2010. № 3. С. 31—36.

3. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. Пер. с англ. А. Г. Овчинников. М.: Машиностроение, 1979. 567 с.

4. Виноградов Ю. В. Моделирование процесса резания металла методом конечных элементов: Дис. ... канд. техн. наук. Тула: 2004. 119 с.

5. Залогов В. А., Криворучко Д. В., Хвостик С. Н. О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резания методом конечных элементов // Вісник СумДУ. 2006. № 12(96). С. 101—114.

6. Криворучко Д. В., Залогов В. О., Корбач В. Г. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів // Нав-

чальний посібник. Суми: Видавництво СумДУ, 2009. 209 с.

7. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.

8. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия, 1976. 488 с.

9. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 175 с.

10. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла // Физика и техника высоких давлений. 1983. № 11. С. 28—32.

11. Шестаков Н. А. Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad (решение задач энергетическим методом). М.: МГИУ. 2007. 333 с.

12. Попов Е. А., Ковалев В. Г., Шубин И. Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 480 с.