

**Моделирование термодинамически неустойчивых  
процессов резания труднообрабатываемых материалов**

*Хейфец М.Л.*

*(Полоцкий государственный университет)*

Для повышения эффективности процессов механической обработки возможно применение различных методов воздействия на зону формообразования через обрабатываемый материал, инструмент и посредством технологической среды. Наиболее широкое применение получили нагрев обрабатываемого материала [1], дополнительные перемещения лезвия инструмента [2], использование смазки и покрытий [3].

При обработке давлением, резанием хрупких материалов на малых скоростях устойчивость процессов нарушается вследствие образования опережающей трещины в материале, что приводит к формированию элементов скальвания [4]. Интенсификация процессов увеличением скорости обработки или дополнительным нагревом переводит металл в более пластичное состояние и обеспечивает формирование поверхности с уступами или суставчатой стружки. Нарушение термодинамического равновесия в результате самоорганизации процесса трения приводит к тому, что термодинамическое упрочнение пластичного обрабатываемого материала образует застойные диссипативные структуры в виде наростов [5]. Дальнейшее увеличение скорости обработки не оставляет возможности заторможенным объемам металла закрепиться на инструменте и после переходного пульсирующего режима контактного взаимодействия по передней и задней поверхностям режущего лезвия обеспечивается стабильное пластическое течение материала или формирование сливной стружки [6]. При высоких скоростях обработки пластичных материалов температурное разупрочнение металла в узкой локализованной зоне наиболее интенсивных деформаций приводит к потере устойчивости зоны структурообразования и в результате этого – к локализованным термопластическим сдвигам. Вследствие развития неустойчивости в условиях адиабатического сдвига формируется ступенчатая стружка [7].

Для изучения многообразия термодинамических неустойчивостей в процессах резания труднообрабатываемых материалов целесообразно рассмотреть математическую модель, провести ее анализ и сравнить полученные численные решения с результатами экспериментов при обработке различных материалов [2].

Уравнения векторного поля. Рассмотрим в зоне формирования поверхности механической обработкой поле экстенсивных величин, описывающих состояние системы с позиций мезоскопического подхода, и сравним это описание с результатами, полученными с позиций макроскопического и микроскопического подходов [8] (Экстенсивная функция состояния системы описывается выражением [9]:

$$Z(\tau) = \int z(r, \tau) dr ,$$

где  $Z$  и  $z$  – экстенсивная функция состояния системы и ее плотность;

$V$  – объем;

$r$  и  $\tau$  – текущие координаты и время.

Общее локальное уравнение баланса величины  $Z$ :

$$dz(r, \tau)/d\tau + \nabla \cdot F_z(r, \tau) = q_z(r, \tau),$$

где  $F_z$  – локальная плотность потока величины  $Z$ ;

$q_z$  – локальная мощность источника.

В явном виде уравнения баланса представляют собой уравнения гидродинамического поля:

$$d\rho/d\tau + \nabla \cdot (\rho v) = 0; \tag{1}$$

$$d(\rho v)/d\tau + \nabla \cdot (\rho v v) + \nabla \cdot P_m = \rho F_m; \tag{2}$$

$$d(\rho e)/d\tau + \nabla \cdot (\rho e v) + \nabla \cdot F_q = F_m F_d - P_m \cdot \nabla \cdot v,$$

где  $\rho$  – плотность материала;

$v$  – скорость потока;

$e$  – удельная энергия;

$P_m$  – тензор давления;

$F_m$  – распределенная сила тяжести;

$F_q$  и  $F_d$  – плотности теплового и диффузионного потоков.

Используя уравнения баланса (1)–(3) и фундаментальное уравнение Гиббса

$$T \delta \varepsilon = \delta e + P_m \delta(1/\rho),$$

можно получить уравнение локальной плотности энтропии  $\rho \varepsilon$  [9]:

$$d(\rho \varepsilon)/d\tau + \nabla \cdot (\rho \varepsilon v) + \nabla \cdot F_\varepsilon = \sigma ,$$

где  $T$  – абсолютная температура;  $\varepsilon$  – энтропия;

$F_\varepsilon$  – плотность потока энтропии.

Производство энтропии  $\sigma$  (4) позволяет определить условие устойчивости стационарных состояний открытой системы:  $d\sigma/d\tau \leq 0$  [10]. Следовательно, образование диссипативных структур имеет особые

критерии энтропии, которые с позиций макроскопического подхода в частных случаях могут быть представлены как физические критерии [8].

Для рассмотрения уравнений поля с позиции микроскопического подхода целесообразно воспользоваться методом случайных фазовых функции [11]. Микроскопическая плотность в фазовом пространстве описывается выражением:

$$N(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \tau) = \sum_{i=1}^n \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(\tau)) \delta(\mathbf{p} - \mathbf{p}_i(\tau)),$$

и удовлетворяет уравнению

$$dN/d\tau + (P/m)dN/dr + f dN/dp = 0,$$

где  $N$  – микроскопическая плотность;  $\mathbf{p}$  и  $m$  – импульс и масса частицы;

$\mathbf{f}$  – микроскопическая сила, определяемая всеми частицами и внешним воздействием.

Мезоскопические характеристики поля определяются как моменты микроскопической плотности в фазовом пространстве [11]. Усреднение получаемых стохастических уравнений поля по всему ансамблю частиц дает полученные уравнения гидродинамического поля (1)–(3), которые, таким образом, пригодны для описания как на макроскопическом, так и на микроскопическом структурных уровнях термодинамических неустойчивостей в процессах механической обработки [2].

Общее решение уравнений. Решение уравнений (1)–(3) при неизменных характеристиках обрабатываемого материала, отсутствии дополнительных источников энергии, при постоянных ненулевых скоростях и других составляющих режима механической обработки имеет вид:

$$\mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v}^* \quad (5)$$

так как  $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{v}^*) = 0$ , где  $\mathbf{v}^*$  – составляющая вращения в потоке, движущемся со скоростью  $\mathbf{v}$ .

Рассмотрим физический смысл решения (5) уравнений (1)–(3), описывающих процесс механической обработки полями скоростей  $\mathbf{v}$  (5). По законам сохранения энергии и импульса  $\mathbf{A}^* = L\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{P} = (\rho/\tau)\mathbf{v}$ , следовательно, при постоянном пути формообразования  $L$  неизменной производительности обработки  $\rho/\tau$  поля скоростей, плотности импульсов и внутренней энергии можно описывать такой динамической характеристикой, как сила формообразования при обработке  $\mathbf{P}$ .

Расходимость потока векторного поля для силы  $\mathbf{P}$  описывается выражением

$$\nabla \cdot \mathbf{P} = i dP_x / dx + j dP_y / dy + k dP_z / dz, \quad (6)$$

вращение, вихри потока векторного поля – выражением

$$\nabla \times \mathbf{P} = i (dP_z / dy - dP_y / dz) + j (dP_x / dz - dP_z / dx) + k (dP_y / dx - dP_x / dy). \quad (7)$$

Расходимость потока наблюдается в зоне формообразования в результате перехода обрабатываемого материала в стружку (рис. 1). При изменении соотношения составляющих силы резания  $P_z/P_y$  (рис. 1, I) происходит поворот условной плоскости стружкообразования в различные стороны для хрупких, малопластичных (рис. 1, а) и для вязких, высокопластичных материалов (рис. 1, б). Это приводит к прогибам плоскости стружкообразования в результате изменений сечений рассматриваемых потоков (рис. 1, II) аналогично процессам, происходящим при движении жидкости в коленах труб различных сечений. Прогибы плоскости стружкообразования ведут к формированию складок на свободной поверхности металла, движения которых носят волновой характер. Движения складок вследствие изменения скоростей потоков у поверхности сопровождаются образованием вихрей у режущей кромки (рис. 1, III). Аналогичные процессы можно наблюдать при переходе потока жидкости из ламинарного в турбулентное состояние [12]. Вихри облегчают движение складок и поворачивают плоскость стружкообразования в прежнее положение.

Постоянно формирующиеся вихри приводят к образованию застойных диссипативных структур в виде наростов на режущем лезвии или участков ступенчатой стружки, отделенных друг от друга локализованной зоной адиабатического сдвига. Процессы, аналогичные наростообразованию, происходят при образовании осадка в коленах труб при переходе к большему сечению в результате снижения скорости потока жидкости, а циклические процессы – при переходе к меньшему сечению вследствие возрастания скорости потока. Застойные структуры изменяют сечения потоков и тем самым разворачивают к прежнему значению угла сдвига плоскость стружкообразования, периодически смещая ее на величину равную размерам вихревых структур.

Рассмотренные процессы при обычном (ортогональном) резании, когда  $x = \text{const}$ , а  $dP_x = 0$ , описываются слагаемыми  $j dP_y / dy + k dP_z / dz$  выражения (6) и представляют собой расходимость потока в виде поверхностей стружкообразования в плоскости YOZ. Слагаемым  $i (dP_y / dy - dP_z / dz)$  выражения (7) описываются вихри при образовании наростов, когда  $dy \ll dz$ , а  $dP_y \ll dP_z$  адиабатические сдвиги при ступенчатом стружкообразовании, когда  $dy \gg dz$ , а  $dP_y \gg dP_z$ .

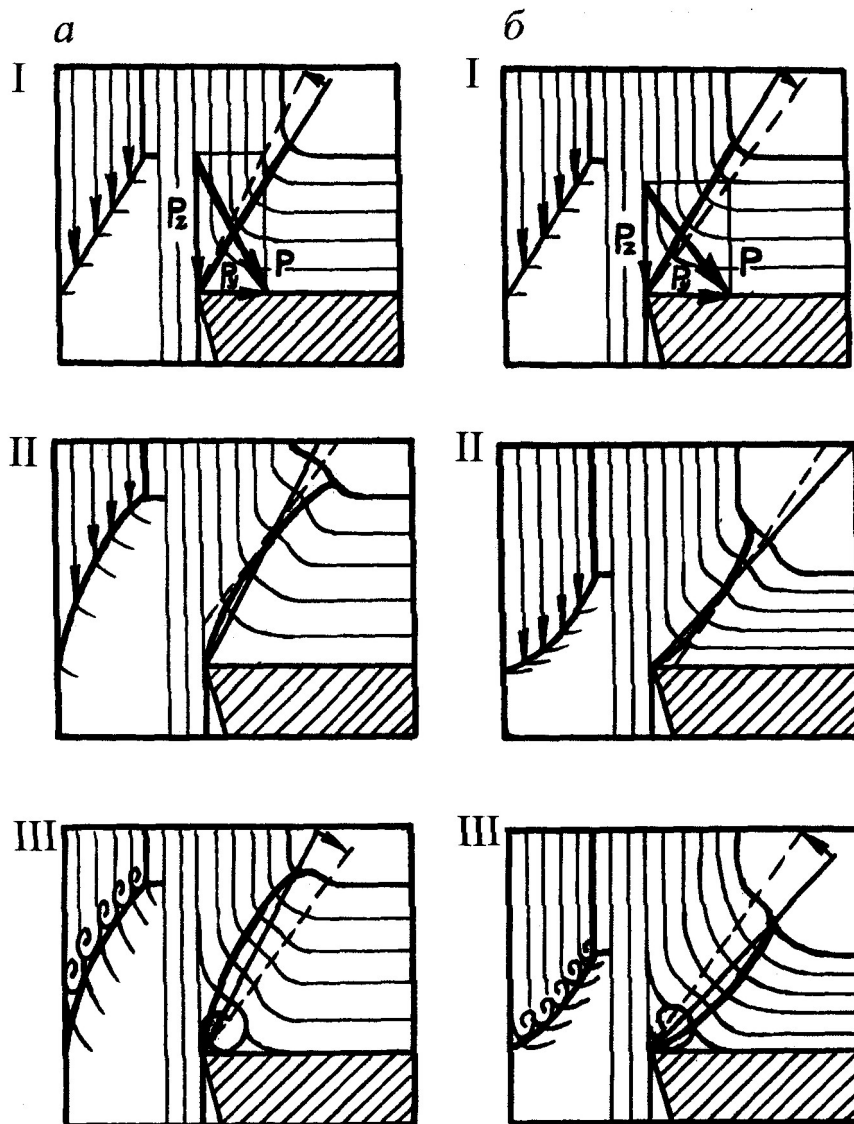


Рис. 1. Схемы формирования вихревых диссипативных структур при термодинамических неустойчивостях в виде нароста (а) и ступенчатой стружки (б). (Слева показаны аналогии при движении потока жидкости)

Исследуем завивание стружки при несвободном (косоугольном) резании [13]. Исключая из рассмотрения плоскость YOZ и принимая  $z = \text{const}$ , а  $dP_z = 0$ , получаем, что слагаемыми  $idP_x/dx + dx + idP_y/dy$  (6) описывается расходимость потока в результате поворота поверхности стружкообразования в плоскости XOY. Слагаемым  $k(dP_y/dx - dP_x/dy)$  (7) описывается завивание стружки при высоких скоростях подачи инструмента, большой величине угла наклона режущей кромки, когда  $dx \gg dy$ , а  $dP_x \gg dP_y$ . При малых подачах, отрицательной величине угла наклона лезвия или при вращении инструмента в направлении, противоположном подаче, когда  $dx \ll dy$ , а  $dP_x \ll dP_y$  завивание стружки происходит в противоположном направлении.

При резании инструментом с дополнительной степенью свободы режущего лезвия в плоскости XOY [2], когда  $y = \text{const}$ , а  $dP_y = 0$ , согласно слагаемым  $idP_x/dx + kdP_z/dz$  (6), описывающим расходимость потока, происходит поворот поверхности стружкообразования в плоскости XOZ. Слагаемым  $j(dP_x/dz - dP_z/dx)$  (7) описывается свободное вращение режущего лезвия ротационного инструмента под действием моментов резания и трения, когда  $dx \ll dz$ , а  $dP_x \ll dP_z$  – в направлении вращения заготовки и когда  $dx \gg dz$ , а  $dP_x \gg dP_z$  – в направлении схода стружки.

Исследование векторных полей распределенных характеристик процессов термомеханической обработки при формировании вихревых диссипативных структур в настоящее время затруднительно [14]. Поэтому для экспериментальной проверки математической модели был выбран метод физико-химической обработки, позволяющий управлять термодинамическими процессами в зоне формообразования посредством дополнительных механических и тепловых воздействий, – ротационное резание с предварительным нагревом срезаемого слоя. Изучение составляющих силы резания при свободном вращении ротационного



$$M = C_M t S^{0,7}. \quad (10)$$

Для описания процесса резания титановых сплавов обычным резцом также подходит формула (9). Для несвободного резания круглым резцом, даже при его самовращении, в формулах сил и моментов показатели степени  $x_i$  и  $y_i$  изменяются, так как при вращении резца увеличивается скорость резания, что приводит к формированию ступенчатой стружки, которую не успевает отводить вращающийся резец.

При резании хромоникелевых сталей обычным резцом, особенно при использовании дополнительного плазменного нагрева, периодически изменяется сечение среза, что не позволяет применять для описания процессов резания с нагревом формулу (9). Ротационный резец дает возможность интенсивно отводить стружку и позволяет описывать процесс резания формулами моментов (10). Исключениями в данном случае являются материалы, содержащие поры и включения, как, например, наплавки, при обработке которых вращающимся резцом не наблюдается стабилизации процесса стружкообразования.

При резании стальных и хромоникелевых порошковых материалов обычным резцом наличие пор изменяет площадь сечения среза. При ротационном резании порошковых материалов не происходит столь интенсивного смятия пор и для его описания целесообразно пользоваться моментами резания, показатели степени  $x_i$  и  $y_i$  которых близки к показателям в формуле (10).

Анализ экспериментальных данных по составляющим силы резания  $P_x, P_y, P_z$  при обработке различных металлов показал, что для описания устойчивых процессов резания с небольшими поправками на материал (его физико-механические свойства, структуру, химический состав) целесообразно использовать формулы сил (9) и моментов (10).

Рассмотрим процессы, происходящие в зоне стружкообразования. Для этого исследуем параметры, аналогичные напряжениям при обработке обычным резцом:  $\sigma_e = P_z / Stk_1$  [16] – эффективным, при которых начинается пластическое течение металла;  $\sigma_v = P_z / St$  [17] – условным, характеризующим энергоёмкость процесса, и  $\sigma_b = \sigma_e \sigma_v \cdot (\sigma_e + \sigma_v) = P_z / (St(k_1 + 1))$  – временному сопротивлению материала, для которых  $k_1$  и  $k_a$  – продольная и поперечная усадки стружки.

Результаты исследований [2] показали, что при обработке самовращающимся круглым резцом напряженное состояние в зоне резания целесообразно описывать параметрами, характеризующими напряжения на участках единичной длины в направлениях главного движения  $v - \sigma_z$ , перемещения режущего лезвия  $v_r - \sigma_x$ , и с учетом взаимозависимости движений  $v$  и  $v_r$  посредством момента резания  $M$  параметрами  $\sigma_{xz} = \sigma_x \sigma_z$  [2, 14].

Для конструкционных сталей параметры напряжений при обработке с дополнительными перемещениями лезвия целесообразно описывать приближенно:

$$\sigma_{xz} = C_\sigma S^{-0,3}, \quad (11)$$

при обработке обычным резцом [16]:

$$\sigma_z = C_\sigma = \text{const}. \quad (12)$$

Представим соотношение  $tS^{0,7}$  в формулах сил (9) и моментов (10), используя напряжения (11), (12), в виде критериев: Рейнольдса  $Re = vt/v$ , описывающего переход ламинарного движения в турбулентное, Прандтля  $Pr = v/\omega$ , характеризующего способность теплоты распространяться в данной среде и Пекле  $Pe = RePr$ , в которых коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  описывает касательные напряжения:

$$Re^* = tS^{0,7} = \frac{vtS}{\nu S^{0,3}} = \frac{vt}{(C_\sigma / \sigma_{xz})(v/S)} = \frac{vt}{(\sigma_z / \nu_{xz})(v/S)} = \frac{vt}{v^*} = \frac{vt}{\omega Pr^*} = \frac{Pe}{Pr^*}, \quad (13)$$

где  $v^* = (C_\sigma \sigma_{xz})(v/S)$ ;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности.

Формула (13) показывает, что при неизменном съеме материала в единицу времени  $vt = \text{const}$  при увеличении  $Re^*$  и уменьшении  $Pr^*$  до критического значения образуются вихри. Это происходит в результате снижения  $C_\sigma$  – константы обрабатываемого материала – вследствие разогрева зоны резания, когда материал не имеет возможности свободно перемещаться в этой зоне ( $\sigma_{xz} \rightarrow 0$ ), либо в результате увеличения скорости  $V$ , что также сопровождается нагревом зоны, при отсутствии возможности инструменту дополнительно перемещаться в направлении  $S$ , не совпадающем с направлением главного движения  $v$ .

Таким образом, формулы сил (9) и моментов (10), а также напряжений (11) и (12) в зоне стружкообразования позволяют описывать устойчивость процессов и дают возможность определить по критериям  $Re^*$  и  $Pr^*$  образование таких термодинамических неустойчивостей, как наросты, адиабатические сдвиги и др.

Исследование устойчивости состояний системы. Для исследования термодинамических неустойчивостей состояний системы при обработке рассмотрим изменения составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ :

$$\begin{aligned} dP_z / dt &= C_3 t^{x_3} S^{y_3} v^{z_3} (x_3 / t + y_3 / S + z_3 / v) \approx P_z (x_3 / t + y_3 / S); \\ dP_y / dt &= C_2 t^{x_2} S^{y_2} v^{z_2} (x_2 / t + y_2 / S + z_2 / v) \approx P_y (x_2 / t + y_2 / S), \end{aligned}$$

вследствие малости  $z_2$  и  $z_3$ . Особые равновесные точки  $\{(1/t)_c; (1/S)_c\}$ , в которых  $P_z$  и  $P_y = \text{const}$ , позволяют по характеру траектории

$$\frac{dP_y}{dP_z} = \frac{P_y(x_2/t + y_2/S)}{P_z(x_3/t + y_3/S)}$$

судить об устойчивости равновесия при относительных отклонениях [9]:

$$(1/t)_\Delta = (1/t) - (1/t)_c; (1/S)_\Delta = (1/S) - (1/S)_c.$$

Для исследования устойчивости производные относительных отклонений линеаризуем, считая, что изменения  $(1/t)_\Delta$  и  $(1/S)_\Delta$  пропорциональны изменениям  $P_z$  и  $P_y$ :

$$d(1/t)_\Delta/d\tau = x_3(1/t)_\Delta + y_3(1/S)_\Delta;$$

$$d(1/S)_\Delta/d\tau = x_2(1/t)_\Delta + y_2(1/S)_\Delta.$$

Решения уравнений в виде

$$(1/t)_\Delta = A_1 \exp(p_1\tau) + A_2 \exp(p_2\tau), (1/S)_\Delta = B_1 \exp(p_1\tau) + B_2 \exp(p_2\tau)$$

определяются корнями характеристического уравнения

$$p^2 - (x_3 + y_2)p + (x_3y_2 - x_2y_3) = 0.$$

Тип равновесия в точке  $\{(1/t)_c; (1/S)_c\}$  зависит от корней  $p_1$  и  $p_2$  уравнения (14).

Исследование устойчивости процессов резания для различных обрабатываемых материалов проводилось по экспериментальным данным [2, 14]. Рассматривались характеристические уравнения для составляющих сил и моментов резания, определяющих поведение траекторий при обработке обычным и круглым резцом – невращающимся принудительно и самовращающимся в различных плоскостях, а также при использовании предварительного нагрева срезаемого слоя. В результате расчетов получены два типа равновесных состояний из шести возможных [9].

$p_1$  и  $p_2$  – действительные положительные числа – неустойчивый узел (НУ). При неустойчивом режиме узлового типа система удаляется от положения равновесия, совершая аperiodическое самовозбуждающееся движение, которое при известных условиях может перейти в периодические колебания с нарастающей амплитудой. В таком случае говорят о режиме самовозбуждающихся колебаний, фазовая траектория которых имеет вид раскручивающейся спирали. В реальных системах нарастание амплитуды ограничивается физическими процессами, в результате чего возникает устойчивое периодическое движение с постоянной по времени амплитудой. Фазовая траектория при этом накручивается на изолированную замкнутую кривую, соответствующую устойчивым автоколебаниям, и представляет собой предельный цикл. Такой ее тип реализуется при периодическом наростообразовании, ступенчатом (циклическом) стружкообразовании и формировании других термодинамических неустойчивостей.

$p_1$  и  $p_2$  – действительные числа с разными знаками – неустойчивое седло (НС). При малых отклонениях от положения равновесия в неустойчивом режиме типа седла система начинает удаляться в заданном направлении. Всегда существует два новых стабильных состояния, к которым приближается система. Неустойчивость этого типа при резании металлов имеет качественно иной структурный уровень и проявляется при стабильном процессе в виде сдвигов на плоскостях стружкообразования по дислокационному или другим механизмам, связанным с тонкой кристаллической структурой материала.

Изучение неустойчивостей в процессах резания конструкционных сталей показало, что при отсутствии вращения инструмента стабильное стружкообразование описывается фазовыми траекториями составляющих силы резания. Принудительное вращение и самовращение инструмента требуют описания процесса траекториями составляющих момента резания, а составляющими силы резания можно ограничиться только в плоскости, перпендикулярной дополнительному перемещению режущей кромки [2].

Стабильность стружкообразования при резании титановых сплавов нарушается вследствие формирования ступенчатых (циклических) стружек при высоких скоростях резания, о чем свидетельствуют фазовые траектории составляющих сил и моментов. Изменение сечения стружки, ее пакетирование у режущей кромки при обработке с нагревом хромоникелевых сталей сказываются на фазовых траекториях составляющих силы резания. Вращение инструмента изменяет тип неустойчивости процесса резания, но в недостаточной мере стабилизирует стружкообразование. Вращение инструмента при обработке стальных и хромоникелевых порошковых материалов полностью стабилизирует процесс стружкообразования, что подтверждают фазовые траектории составляющих сил и моментов резания [14].

Малое отличие корней  $p$  характеристических уравнений от нуля свидетельствует о низкой структурной устойчивости системы резания, для которой при малозначительных изменениях параметров процесса структура фазового портрета изменяется.

Таким образом, низкая структурная устойчивость технологической системы свидетельствует о необходимости детального исследования термодинамических неустойчивостей в разрабатываемых процессах резания как новых, так и традиционных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Обработка износостойких покрытий / Под ред. Ж.А. Мрочка. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
3. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
4. Вульф А.М. Резание металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
5. Кабалдин Ю.Г., Медведева О.И. Повышение качества обработанной поверхности при точении углеродистых сталей //Вестник машиностроения. – 1989. – № 5. – С. 3–37.
6. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.
7. Таланов Н.В. Физические основы процесса резания //Физические процессы при резании металлов. – Волгоград, 1984. – С. 3–37.
8. Хакен Г. синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
9. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. – М.: Мир, 1979. – 279 с.
10. Глендсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
11. Климонтович Ю.Л. Кинематическая теория неидеального газа и неидеальной плазмы. – М.: Наука, 1975. – 352 с.
12. Берже РП., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности. – М.: Мир, 1991. – 368 с.
13. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. – Фрунзе: Мектеп, 1970. – 170 с.
14. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММС НАНБ, 199. – 276 с.
15. Адаптивное управление станками / Под ред. Б.С. Балкшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 668 с.
16. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Т.3. – Томск: Красное знамя, 1944. – 742 с.
17. Старков В.К. Дислокационное представление о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 100 с.
18. Горезко П.А. Взаимосвязь процессов резания и растяжения металлов. – Минск: АН БССР, 1959. – 71 с.