

УДК 621.91

М.Л. Хейфец, д-р техн. наук, Минск, Республика Беларусь,  
С.А. Клименко, д-р техн. наук, Киев, Украина

## **АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ**

*Представлений підхід до аналізу термодинамічних нестійкостей, які мають місце при стружкоутворенні у процесах різання. Висловлено два види нестійкостей – нестійкий вузол і нестійке сідло. Перший вид відповідає нестабільним процесам з періодичним наросто- і переривчастим стружкоутворенням, другий – сталим процесам зі стружкоутворенням, обумовленим структурою матеріалу.*

*Представлен подход к анализу термодинамических неустойчивостей, имеющих место при стружкообразовании в процессах резания. Выявлено два вида неустойчивостей – неустойчивый узел и неустойчивое седло. Первый вид соответствует нестабильным процессам с периодическим наросто- и прерывистым стружкообразованием, второй – стабильным процессам со стружкообразованием, обусловленным структурой материала.*

*The approach for analysis of thermodynamical instability when chip formation of cutting processing. Two types of instability are determined: instable unit and instable saddle. The first one responds to instable processes with periodic scab occurring and interrupting chip formation, the other one – related to stable processes with chip formation resulting from the structure of material machined.*

### **Введение**

Для повышения эффективности управления процессами 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, дополнительные перемещения лезвия инструмента, использование смазки и покрытий.

При обработке резанием хрупких материалов с малыми скоростями устойчивость процессов нарушается вследствие образования опережающей трещины в материале, что приводит к формированию элементов скалывания. Интенсификация процессов за счет увеличения скорости резания или дополнительного нагрева обеспечивает формирование суставчатой стружки. Нарушение термодинамического равновесия в результате самоорганизации процесса трения в контактной зоне приводит к тому, что термодеформационное упрочнение пластичного обрабатываемого материала образует застойные диссипативные структуры в виде наростов [1]. Дальнейшее увеличение скорости обработки не позволяет заторможенным объемам металла закрепиться на инструменте и после переходного пульсирующего режима контактного взаимодействия на передней и задней

поверхностях режущего инструмента обеспечивается стабильное пластическое течение материала и формирование сливной стружки [2]. При высоких скоростях резания пластичных металлов их температурное разупрочнение 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 [3].

Для изучения термодинамических неустойчивостей в процессах механической обработки целесообразно рассмотреть их математическую модель, провести ее анализ и сравнить полученные решения с результатами экспериментов при обработке различных материалов.

### **Результаты исследований**

Рассмотрим поле экстенсивных величин, описывающих состояние системы [4] в зоне формирования поверхности механической обработкой.

Экстенсивная функция состояния системы описывается выражением [5]

$$Z(\tau) = \int z(\mathbf{r}, \tau) d\mathbf{r}$$

где  $Z$  и  $z$  – экстенсивная функция состояния системы и ее плотность;  $V$  – объем;  $\mathbf{r}$  и  $\tau$  – текущие координаты и время;

Общее локальное уравнение баланса величины  $Z$ :

$$\partial z(\mathbf{r}, \tau) / \partial \tau + \nabla \cdot \mathbf{F}_z(\mathbf{r}, \tau) = q_z(\mathbf{r}, \tau)$$

где  $\mathbf{F}_z$  – локальная плотность потока величины  $Z$ ;  $q_z$  – локальная мощность источника.

В явном виде уравнения баланса представляют собой уравнения гидродинамического поля:

$$\partial \rho / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{1.1}$$

$$\partial (\rho \mathbf{v}) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) + \nabla \cdot \mathbf{P}_m = \rho \mathbf{F}_m \tag{1.2}$$

$$\partial (\rho e) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{v}) + \nabla \cdot \mathbf{F}_q = \mathbf{F}_m \mathbf{F}_d - \mathbf{P}_m \cdot \nabla \cdot \mathbf{v} \tag{1.3}$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $\mathbf{v}$  – скорость потока;  $e$  – удельная энергия;  $\mathbf{P}_m$  – тензор давления;  $\mathbf{F}_m$  – распределенная сила тяжести;  $\mathbf{F}_q$  и  $\mathbf{F}_d$  – плотности теплового и диффузионного потоков.

Используя уравнения баланса (1.1–1.3) и фундаментальное уравнение

Гиббса

$$T\delta\varepsilon = \delta e + \mathbf{P}_m \delta(1/\rho),$$

можно получить уравнение локальной плотности энтропии  $\rho\varepsilon$  [5]

$$\partial(\rho\varepsilon)\partial\tau + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\mathbf{v}) + \nabla \cdot \mathbf{F}_\varepsilon = \sigma \quad (1.4)$$

где  $T$  – абсолютная температура;  $\varepsilon$  – энтропия;  $\mathbf{F}_\varepsilon$  – плотность потока энтропии.

Зависимость (1.4) позволяет определить условие устойчивости стационарных состояний открытой системы  $d\sigma/dt \leq 0$  [6], а особые критерии энтропии, связанные с образованием диссипативных структур, могут быть представлены как физические характеристики [4].

Решение уравнений (1.1–1.3) при неизменных характеристиках обрабатываемого материала, отсутствии дополнительных источников энергии, при постоянных ненулевых скоростях и других составляющих режима механической обработки имеет вид

$$\mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v}^* \quad (1.5)$$

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

Рассмотрим физический смысл решения (1.5) уравнений (1.1–1.3), описывающих процесс механической обработки полями скоростей  $\mathbf{v}$  (1.5). По законам сохранения энергии и импульса  $A^* = \mathbf{L}\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{P} = (\rho/\tau)\mathbf{v}$ , следовательно, при постоянном пути формообразования  $\mathbf{L}$  и неизменной производительности обработки, 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

$$\nabla \cdot \mathbf{P} = \mathbf{i}\partial P_x/\partial x + \mathbf{j}\partial P_y/\partial y + \mathbf{k}\partial P_z/\partial z \quad (1.6)$$

вращение, вихри потока векторного поля – выражением

$$\nabla \times \mathbf{P} = \mathbf{i}(\partial P_z / \partial y - \partial P_y / \partial z) + \mathbf{j}(\partial P_x / \partial z - \partial P_z / \partial x) + \mathbf{k}(\partial P_y / \partial x - \partial P_x / \partial y) \quad (1.7)$$

Расходимость потока наблюдается в зоне формообразования в результате перехода обрабатываемого материала в стружку.

Изменению соотношения составляющих силы резания  $P_z/P_y$  (рис. 1, I) соответствует поворот условной плоскости стружкообразования в различные стороны для хрупких, малопластичных (рис. 1.6, а), а также вязких, высокопластичных материалов (рис. 1.6, б). Это приводит к прогибам плоскости стружкообразования в результате изменений сечений рассматриваемых потоков (рис. 1.6, II) аналогично процессам, происходящим при движении жидкости в коленах труб различных сечений. Прогибы плоскости стружкообразования обуславливают формирование складок на свободной поверхности металла, движения которых носят волновой характер [7]. Движение складок вследствие изменения скоростей потоков у поверхности сопровождается образованием вихрей у режущей кромки (рис. 1.6, III). Аналогичные процессы можно наблюдать при переходе потока жидкости из ламинарного в турбулентное состояние [8]. Вихри облегчают движение складок и поворачивают плоскость стружкообразования в начальное положение.

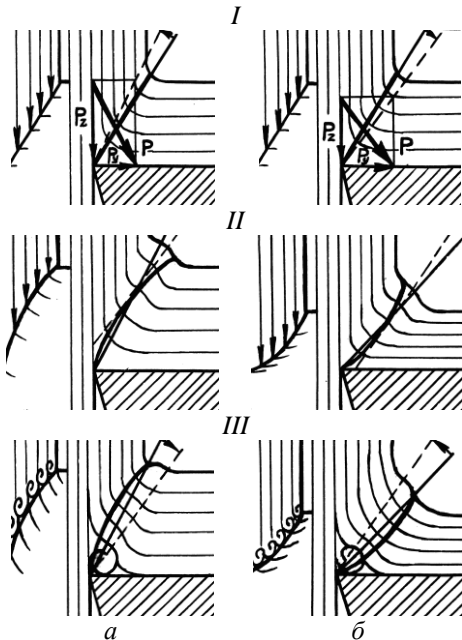


Рисунок 1 – Схемы формирования вихревых диссипативных структур при термодинамических неустойчивостях в виде нароста (а) и ступенчатой стружки (б). (Слева показаны аналогии при движении потока жидкости)

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 положению плоскость стружкообразования, периодически смещая ее на величину, отвечающую размерам вихревых структур.

Рассмотренные процессы при обычном (ортогональном) резании, когда  $x = const$ , а  $\partial P_x = 0$ , описываются слагаемыми

$$\mathbf{j}\partial P_y/\partial y + \mathbf{k}\partial P_z/\partial z$$

выражения (1.6) и представляют собой расходимость потока в виде поверхностей стружкообразования в плоскости  $YOZ$ . Слагаемым

$$\mathbf{i}(\partial P_z/\partial y - \partial P_y/\partial z)$$

выражения (1.7) описываются вихри при образовании наростов, когда  $\partial y \ll \partial z$ , а  $\partial P_y \ll \partial P_z$ , и адиабатические сдвиги при ступенчатом стружкообразовании, когда  $\partial y \gg \partial z$ , а  $\partial P_y \gg \partial P_z$ .

Рассмотрим завивание стружки при несвободном косоугольном резании. Исключая из рассмотрения плоскость  $YOZ$  и принимая  $z = const$ , а  $\partial P_z = 0$ , получаем, что слагаемыми выражения (1.6)

$$\mathbf{i}\partial P_x/\partial x + \mathbf{j}\partial P_y/\partial y$$

описывается расходимость потока в результате поворота поверхности стружкообразования в плоскости  $XOY$ . Слагаемым выражения (1.7)

$$\mathbf{k}(\partial P_y/\partial x - \partial P_x/\partial y)$$

описывается завивание стружки при высоких значениях подачи инструмента и большой величине угла наклона режущей кромки, когда  $\partial x \gg \partial y$ , а  $\partial P_x \gg \partial P_y$ . При малых подачах, отрицательной величине угла наклона лезвия или при вращении инструмента в направлении, противоположном подаче, когда  $\partial x \ll \partial y$ , а  $\partial P_x \ll \partial P_y$ , завивание стружки происходит в противоположном направлении.

При резании инструментом с дополнительной степенью свободы режущего лезвия в плоскости  $XOY$  [9], когда  $y = const$ , а  $\partial P_y = 0$ , согласно слагаемым выражения (1.6)

$$\mathbf{i} \partial P_x / \partial x + \mathbf{k} \partial P_z / \partial z ,$$

описывающим расходимость потока, происходит поворот поверхности стружкообразования в плоскости  $XOZ$ . Слагаемым выражения (1.7)

$$\mathbf{j}(\partial P_x / \partial z - \partial P_z / \partial x)$$

описывается свободное вращение режущего лезвия ротационного инструмента под действием моментов резания и трения, когда  $\partial x \ll \partial z$ , а  $\partial P_x \ll \partial P_z$  – в направлении вращения заготовки и когда  $\partial x \gg \partial z$ , а  $\partial P_x \gg \partial P_z$ , – в направлении схода стружки.

Рассмотрим возможность управления термодинамическими процессами в зоне формообразования посредством дополнительных механических и тепловых воздействий при обработке вращающимся резцом [10].

Вращение, вихри потока векторного поля для силы  $\mathbf{P}$  описываются выражением (1.7), слагаемое которого

$$\mathbf{j}(\partial P_x / \partial z - \partial P_z / \partial x)$$

позволяет описывать свободное вращение ротационного резца в плоскости  $XOZ$  моментом  $\mathbf{M}$  (рис. 2).

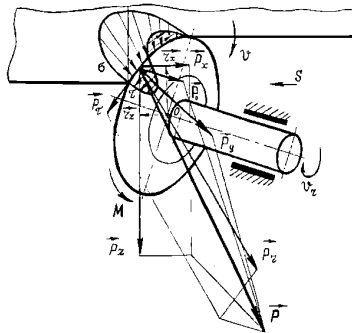


Рисунок 2 – Схемы составляющих сил и моментов формообразования поверхности при механической обработке вращающимся резцом

Момент составляющей силы резания  $\mathbf{P}_z$  относительно плеча, которое образует перемещение режущей кромки резца  $\partial x$  под действием  $\partial P_x$ , или составляющей силы  $\mathbf{P}_x$  относительно перемещения  $\partial z$  под действием  $\partial P_z$  описывается векторным произведением [11]

$$M = C_M |\mathbf{P}_x \times \mathbf{P}_z| = C_M P_x P_z = C_M M_{xz} . \tag{1.8}$$

где  $C_M$  – коэффициент пропорциональности между составляющей силы резания и перемещением режущего лезвия в направлении ее действия.

Измерение составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  проводились при обработке стали 45 обычным и круглым резцом – невращающимся, принудительно и самовращающимся в различных плоскостях в зависимости от схемы и углов установки. Экспериментальные данные в сравнении с результатами различных авторов [11–14] представлены в табл. 1.

Изучение экспериментальных данных показывает, что для описания процесса резания конструкционных сталей (табл. 1) обычным резцом целесообразно пользоваться приближенной формулой

$$P_z = C_z t S^{0,7}. \quad (1.9)$$

При несвободном резании круглым резцом показатели степени  $x_i$ , и  $y_i$  изменяются вследствие того, что меняется сечение срезаемого слоя. Принудительное перемещение режущей кромки круглого резца позволяет управлять сечением срезаемого слоя, а показатели степени у глубины резания  $t$  и скорости подачи  $S$ , близкие к  $x_i = 1,0$  и  $y_i = 0,7$ . Моменты резания  $M$  в плоскости, соответствующей вращению инструмента:

$$M = C_M t S^{0,7}. \quad (1.10)$$

Анализ экспериментальных данных и данных других авторов по составляющим силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  и моментам резания показал, что для описания устойчивого процесса резания с поправками на обрабатываемый материал (физико-механические свойства, структуру, химический состав) целесообразно использовать формулы (1.9, 1.10).

Рассмотрим напряжения в зоне стружкообразования при обработке обычным резцом ( $k_t$  и  $k_a$  – продольная и поперечная усадки стружки): – эффективные ( $\sigma_e = P_z / St k_t$  [15]), при которых начинается пластическое течение металла; – условные ( $\sigma_v = P_z / St$  [16]), характеризующие энергоемкость процесса; – временное сопротивление материала ( $\sigma_b = \sigma_e \sigma_v / (\sigma_e + \sigma_v) = P_z / [St(k_t + 1)]$  [17]).

Результаты исследований (табл. 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  $\mathbf{v} - \sigma_z$ , перемещения режущего лезвия  $\mathbf{v}_r - \sigma_z$ , и с учетом взаимозависимости движений  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{v}_r$  посредством момента резания  $\mathbf{M}$  параметрами  $\sigma_{xz} = \sigma_x \sigma_z$ .

Таблица 1 – Значения коэффициентов и показателей степени составляющих силы резания  $P = C_i t^{x_i} S^{y_i} v^{z_i} u^{k_i}$ , корни характеристического уравнения  $p_1$ ,  $p_2$  и устойчивость процесса резания при обработке стали 45

$P$	$C_i$	$x_i$	$y_i$	$z_i$	$k_i$	$p_1$	$p_2$	Устой- чи- вость	Тра- ек- тори и
<b>обычный резец</b>									
$P_{35}, H$	4750	0,50	0,50	-0,40		-0,045	1,645	НС	$P_y/P_z$
$P_{35}, H$	2130	0,90	0,60	-0,30					
$P_{35}, H$	2940	1,00	0,75	-0,15					
<b>круглый резец невращающийся</b>									
$P_{35}, H$	560	1,00	1,01	1,99		-0,073	1,423	НС	$P_y/P_z$
$P_{35}, H$	1064	0,86	0,65	0,52					
$P_{35}, H$	1736	0,70	0,65	0,26					
<b>принудительно вращающийся в плоскости XOY, YOZ <math>u = v_r/v = 0,2-0,7</math></b>									
$P_{35}, H$	614	0,88	0,61	0,08	0,54	0,050 -0,062 -0,145	1,329 2,053 2,735	НУ НС НС	$P_y/P_z$ $M_{xy}/P_z$ $M_{xy}/M_y$
$P_{35}, H$	1297	0,60	0,72	-0,26	0,60				
$P_{35}, H$	1968	0,66	0,68	-0,40	-0,43				
$P_{35}, P_{35}, H^2$	7963582	1,48	1,33	-0,18	1,14				
$P_{35}, P_{35}, H^2$	25524996	1,26	1,40	-0,66	0,17				
<b>самовращающийся в плоскостях XOY, YOZ</b>									
$P_{35}, H$	2382	0,67	0,43	-0,19	0,50	0,022 0,001 -0,018	0,968 1,419 1,898	НУ НУ НС	$P_y/P_z$ $M_{xy}/P_z$ $M_{xy}/M_{yz}$
$P_{35}, H$	1821	0,46	0,35	-0,43	0,77				
$P_{35}, H$	1783	0,64	0,44	-0,28	-0,69				
$P_{35}, P_{35}, H^2$	4337622	1,13	0,78	-0,62	1,27				
$P_{35}, P_{35}, H^2$	3246843	1,10	0,79	-0,71	0,08				
<b>самовращающийся в плоскости XOY</b>									
$P_{35}, H$	520	0,45	0,65	-0,36		0,032 0,298 -0,336	1,218 1,602 1,956	НУ НУ НС	$P_y/P_z$ $M_{xy}/P_z$ $M_{xy}/M_{yz}$
$P_{35}, H$	190	0,45	0,25	0,00					
$P_{35}, H$	700	1,00	0,47	-0,33					
$P_{35}, P_{35}, H^2$	98800	0,90	0,90	-0,36					
$P_{35}, P_{35}, H^2$	133000	1,45	0,72	-0,33					
<b>самовращающийся в плоскостях YOZ, XOZ</b>									
$P_{35}, H$	680	0,60	0,39	0,02		-0,076 -0,070 -0,034	0,756 1,350 1,644	НС НС НС	$P_y/P_z$ $M_{xy}/P_z$ $M_{xy}/M_{yz}$
$P_{35}, H$	440	0,51	0,27	0,03					
$P_{35}, H$	750	0,41	0,33	-0,04					
$P_{35}, P_{35}, H^2$	330000	0,92	0,60	-0,01					
$P_{35}, P_{35}, H^2$	510000	1,01	0,72	-0,02					



Таблица 2 – Значения коэффициентов и показателей степени  $C_i t^{x_i} S^{y_i} v^{z_i}$  усадки стружки  $k$  и параметров напряжений  $\sigma$  при резании стали 45 круглым резцом, самовращающимся в плоскостях YOZ, XOZ

$\sigma$	$C_i$	$x_i$	$y_i$	$z_i$
$\sigma_{ex} = P_x k_a / t, \text{ Н/мм}$	1680	0,02	0,00	-0,22
$\sigma_{ez} = P_z / S k_l, \text{ Н/мм}$	304	-0,01	-0,28	0,20
$\sigma_{exz} = M_{xz} k_a / S t k_l, \text{ Н}^2/\text{мм}^2$	510000	0,01	-0,28	-0,02
$\sigma_{vx} = P_x / t, \text{ Н/мм}$	680	-0,40	0,39	0,02
$\sigma_{vz} = P_z / S, \text{ Н/мм}$	750	0,41	-0,67	-0,04
$\sigma_{vzx} = M_{xz} / S t, \text{ Н}^2/\text{мм}^2$	510000	0,01	-0,28	-0,02
$\sigma_{vzx} = M_{xz} / (S t (k_l / k_a + 1)), \text{ Н}^2/\text{мм}^2$	255000	0,01	-0,28	-0,02

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

$$\sigma_{xz} = C_\sigma S^{-0,3}. \tag{1.11}$$

при обработке обычным резцом [15]:

$$\sigma_z = C_\sigma = const. \tag{1.12}$$

Используя выражения для критериев Рейнольдса ( $Re = vt/v^*$ ), описывающего переход ламинарного движения в турбулентное, и Прандтля ( $Pr = v^*/\omega$ ) ( $\omega$  – коэффициент температуропроводности), характеризующего способность теплоты распространяться в данной среде, можно записать выражение для определения критерия Пекле ( $Pe = RePr$ ):

$$Pe = \frac{vt}{\left(\frac{C_\sigma}{\sigma_{xz}}\right) \cdot \left(\frac{v}{S}\right)} = \frac{vt}{\omega Pr}. \tag{1.13}$$

где,  $v^*$  – коэффициент кинематической вязкости, характеризующий касательные напряжения в материале.

Формула (1.13) показывает, что при неизменном съеме материала в единицу времени  $vt = const$  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 резания, при отсутствии возможности у инструмента дополнительно перемещаться в направлении  $S$ , не совпадающем с направлением главного движения  $v$ .

Таким образом, формулы сил (1.9) и моментов (1.10), а также напряжений (1.11) и (1.12) 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.

Для анализа неустойчивостей процесса резания рассмотрим изменение составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$  при обработке:

$$dP_z/d\tau = C_z t^{x_z} S^{y_z} v^{z_z} (x_z/t + y_z/S + z_z/v) \approx P_z(x_z/t + y_z/S),$$

$$dP_y/d\tau = C_y t^{x_y} S^{y_y} v^{z_y} (x_y/t + y_y/S + z_y/v) \approx P_y(x_y/t + y_y/S),$$

Вследствие малости величин  $z_y$  и  $z_z$ , они могут не учитываться.

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

$$\frac{dP_y}{dP_z} = \frac{P_y(x_y/t + y_y/S)}{P_z(x_z/t + y_z/S)}$$

судить об устойчивости равновесия при относительных отклонениях [5]:

$$(1/t)_\Delta = (1/t) - (1/t)_c, \quad (1/S)_\Delta = (1/S) - (1/S)_c$$

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

$$d(1/t)_\Delta/d\tau = x_z(1/t)_\Delta + y_z(1/S)_\Delta,$$

$$d(1/S)_\Delta/d\tau = x_y(1/t)_\Delta + y_y(1/S)_\Delta$$

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

$$p^2 - (x_z + y_z)p + (x_z y_z - x_y y_z) = 0. \quad (1.14)$$

Тип равновесия в точке  $\{(1/t)_c; (1/S)_c\}$  зависит от корней  $p_1$  и  $p_2$  уравнения (1.14).

Исследование неустойчивостей в процессах резания для различных обрабатываемых материалов проводилось по экспериментальным данным (см. табл. 1). 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 [5].

$p_1$  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 тип фазовой траектории реализуется при периодическом наростообразовании, ступенчатом 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 [16] или другим механизмам, связанным с 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.

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

Особенно это заметно при схеме установки, обеспечивающей низкую устойчивость самовращения резца в плоскостях  $XOY$ ,  $YOZ$  (табл. 1).

### **Заключение**

Приведенные результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о перспективности анализа термодинамических неустойчивостей для развития представлений о явлениях, имеющих место при стружкообразовании. Предложенный подход перспективен для создания и совершенствования технологий обработки изделий техники как из новых, так и традиционных конструкционных материалов

**Список использованных источников:** 1. Кабалдин Ю.Г., Медведева О.И. Повышение качества обработанной поверхности при точении углеродистых сталей // Вестник машиностроения. – 1989. – № 5. – С. 3–17; 2. Зорев Н.Н. Вопросы механика процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.; 3. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания // Физические процессы при резании металлов: Сб. науч. тр. – Волгоград: ВПИ, 1984. – С. 3–37; 4. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – М.: Мир, 1991; 5. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. – М.: Мир, 1979. – 279 с.; 6. Глендорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 280 с.; 7. Добролюбов А.И. Волновые движения деформируемых тел и жидкостей: Кинетика и массоперенос. – Мн.: Наука и техника, 1989. – 93 с.; 8. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности. – М.: Мир, 1991. – 368 с.; 9. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А. Соусь А.В. Перспективные схемы ротационного резания металлов. – Мн.: Наука и техника, 1972. – 272 с.; 10. Хейфец М.Л. Исследование термодинамических неустойчивостей в процессах механической обработки. 2 Численное исследование устойчивости // Инженерно-физический журнал. – 1994. – т. 67, № 1-2. – С. 146–153; 11. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицын, А.В. Борисенко, И.Г. Дивотин, В.Я. Лебедев. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 229 с.; 12. Обработка резанием с плазменным нагревом / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.; 13. Повышение эффективности обработки резанием заготовок из титановых сплавов / Н.С. Жучков, П.Д. Бесплахотный, А.Д. Чубаров и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 152 с.; 14. Фельдштейн Е.Э., Николаев В.А. Финишная механическая обработка деталей из порошковых материалов. – Мн.: Вышэйш. шк., 1987. – 131 с.; 15. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Т. 3. – Томск: Красное знамя, 1944. – 743 с.; 16. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.; 17. Горезко П.А. Взаимосвязь процессов резания и растяжения металлов. – Мн.: Изд-во АН БССР, 1959. – 217 с..

**Bibliography (transliterated):** 1. Kabaldin Ju.G., Medvedeva O.I. Povyshenie kachestva obrabotannoj poverhnosti pri tochenii uglerodistyh stalej // Vestnik mashinostroenija. – 1989. – № 5. – S. 3–17; 2. Zorev N.N. Voprosy mehanika processa rezanija metallov. – M.: Mashgiz, 1956. – 368 s.; 3. Talantov N.V. Fizicheskie osnovy processa rezanija // Fizicheskie processy pri rezanii metallov: Sb. nauch. tr. – Volgograd: VPI, 1984. – S. 3–37; 4. Haken G. Informacija i samoorganizacija.

Makroskopicheskiy podhod k slozhnym sistemam. – M.: Mir, 1991; **5.** Jebeling V. Obrazovanie struktur pri neobratimyh processah: Vvedenie v teoriju dissipativnyh struktur. – M.: Mir, 1979. – 279 s.; **6.** Glensdorf P, Prigozhin I. Termodinamicheskaja teorija struktury, ustojchivosti i fluktuacij. – M.: Mir, 1973. – 280 s.; **7.** Dobroljubov A.I. Volnovye dvizhenija deformiruemyh tel i zhidkostej: Kinetika i massoperenos. – Mn.: Nauka i tehnika, 1989. – 93 s.; **8.** Berzhe P., Pomo I., Vidal' K. Porjadok v haose. O deterministicheskom podhode k turbulენტности. – M.: Mir, 1991. – 368 s.; **9.** Konovalov E.G., Sidorenko V.A. Sous' A.V. Perspektivnye shemy rotacionnogo rezanija metallov. – Mn.: Nauka i tehnika, 1972. – 272 s.; **10.** Hejfec M.L. Issledovanie termodinamicheskikh neustojchivostej v processah mehanicheskoy obrabotki. 2 Chislennoe issledovanie ustojchivosti // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 1994. – t. 67, № 1-2. – S. 146–153; **11.** Rotacionnoe rezanie materialov / P.I. Jashhericyn, A.V. Borisenko, I.G. Divotin, V.Ja. Lebedev. – Mn.: Nauka i tehnika, 1987. – 229 s.; **12.** Obrabotka rezaniem s plazmennym nagrevom / Pod. red. A.N. Reznikova. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 232 s.; **13.** Povyshenie jeffektivnosti obrabotki rezaniem zagotovok iz titanovyh splavov / N.S. Zhuchkov, P.D. Bepahotnyj, A.D. Chubarov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 152 s.; **14.** Fel'dshtejn E.Je., Nikolaev V.A. Finishnaja mehanicheskaja obrabotka detalej iz poroshkovyh materialov. – Mn.: Vyshhejsjsh. shk., 1987. – 131 s.; **15.** Kuznecov V.D. Fizika tverdogo tela. T. 3. – Tomsk: Krasnoe znamja, 1944. – 743 s.; **16.** Starkov V.K. Dislokacionnye predstavlenija o rezanii metallov. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 160 s.; **17.** Gorezko P.A. Vzaimosvjaz' processov rezanija i rastjazhenija metallov. – Mn.: Izd-vo AN BSSR, 1959. – 217 s.

*Поступила в редколлегию 15.05.2014*