

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 τ – 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:

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

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

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

где ρ – 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; ε – энтропия; \mathbf{F}_ε – 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.

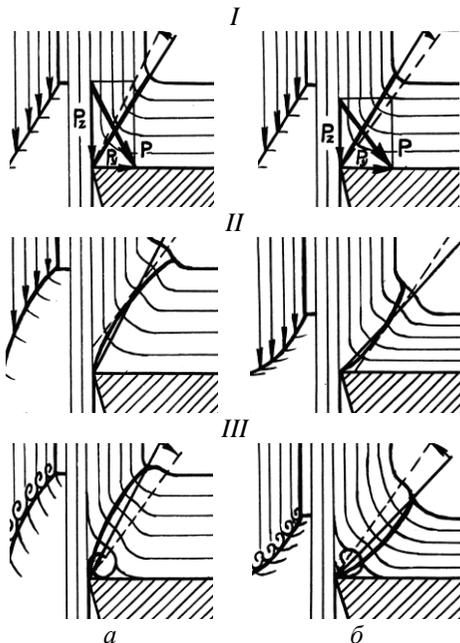


Рисунок 1 – Схемы формирования вихревых диссипативных структур при термодинамических неустойчивостях в виде нароста (а) и ступенчатой стружки (б). (Слева показаны аналогии при движении потока жидкости)

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).

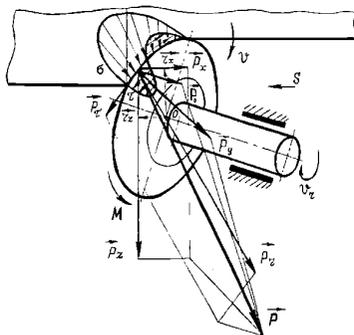


Рисунок 2 – Схемы составляющих сил и моментов формообразования поверхности при механической обработке вращающимся резцом

Момент составляющей силы резания \mathbf{P}_z относительно плеча, которое образует перемещение режущей кромки резца ∂x под действием ∂P_x , или составляющей силы \mathbf{P}_x относительно перемещения ∂z под действием ∂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 ($\sigma_e = P_z / S t k_t$ [15]), при которых начинается пластическое течение металла; – условные ($\sigma_v = P_z / S t$ [16]), характеризующие энергоемкость процесса; – временное сопротивление материала ($\sigma_b = \sigma_e \sigma_v / (\sigma_e + \sigma_v) = P_z / [S t (k_t + 1)]$ [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
обычный резец									
$P_{x, H}$	4750	0,50	0,50	-0,40		-0,045	1,645	НС	P_y/P_z
$P_{y, H}$	2130	0,90	0,60	-0,30					
$P_{z, H}$	2940	1,00	0,75	-0,15					
круглый резец невращающийся									
$P_{x, H}$	560	1,00	1,01	1,99		-0,073	1,423	НС	P_y/P_z
$P_{y, H}$	1064	0,86	0,65	0,52					
$P_{z, H}$	1736	0,70	0,65	0,26					
принудительно вращающийся в плоскости XOY, YOZ $u = v_r/v = 0,2-0,7$									
$P_{x, H}$	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
$P_{y, H}$	1297	0,60	0,72	-0,26	0,60				
$P_{z, H}$	1968	0,66	0,68	-0,40	-0,43				
$P_x P_y / H^2$	7963582	1,48	1,33	-0,18	1,14				
$P_y P_z / H^2$	25524996	1,26	1,40	-0,66	0,17				
самовращающийся в плоскостях XOY, YOZ									
$P_{x, H}$	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}
$P_{y, H}$	1821	0,46	0,35	-0,43	0,77				
$P_{z, H}$	1783	0,64	0,44	-0,28	-0,69				
$P_x P_y / H^2$	4337622	1,13	0,78	-0,62	1,27				
$P_y P_z / H^2$	3246843	1,10	0,79	-0,71	0,08				
самовращающийся в плоскости XOY									
$P_{x, H}$	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}
$P_{y, H}$	190	0,45	0,25	0,00					
$P_{z, H}$	700	1,00	0,47	-0,33					
$P_x P_y / H^2$	98800	0,90	0,90	-0,36					
$P_y P_z / H^2$	133000	1,45	0,72	-0,33					
самовращающийся в плоскостях YOZ, XOZ									
$P_{x, H}$	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}
$P_{y, H}$	440	0,51	0,27	0,03					
$P_{z, H}$	750	0,41	0,33	-0,04					
$P_x P_z / H^2$	330000	0,92	0,60	-0,01					
$P_x P_y / H^2$	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 σ при резании стали 45 круглым резцом, самовращающимся в плоскостях YOZ, XOZ

σ	C_i	x_i	y_i	z_i
$\sigma_{ex} = P_x k_a / t$, Н/мм	1680	0,02	0,00	-0,22
$\sigma_{ez} = P_z / S k_l$, Н/мм	304	-0,01	-0,28	0,20
$\sigma_{exz} = M_{xz} k_a / S t k_l$, Н ² /мм ²	510000	0,01	-0,28	-0,02
$\sigma_{vx} = P_x / t$, Н/мм	680	-0,40	0,39	0,02
$\sigma_{vz} = P_z / S$, Н/мм	750	0,41	-0,67	-0,04
$\sigma_{vxz} = M_{xz} / S t$, Н ² /мм ²	510000	0,01	-0,28	-0,02
$\sigma_{вкz} = M_{xz} / (S t (k_l / k_a + 1))$, Н ² /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 ($Pr = \nu^*/\omega$) (ω – 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_σ – 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_1 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