

// Волновые передачи: Сб. тр.– М.: Станкин, 1970. – С. 90 - 113. **3.** Крахин О.И. Исследование влияния утолщения обода под зубчатым венцом на напряжённое и деформированное состояние гибкого стакана волновой передачи // Волновые передачи: Сб. тр. – М.: Станкин. - 1970. - С.140 - 149. **4.** Колесник А.И. Расчёт деформированного состояния зубчатого венца гибких колёс волновых передач // Волновые передачи: Сб. тр. – М.: Станкин, 1970. - С. 185 - 191. **5.** Синкевич Ю.Б. Анализ напряжённого состояния гибкого колеса - кольца волновой передачи//Волновые передачи: Сб. тр.–М.:Станкин, 1970.– С. 192 – 202. **6.** Тимошенко С.П. Сопротивление материалов.- М.: «Наука», 1965.- 480 с. **7.** Гварамадзе Н.В. Теоретические исследования распределения нагрузки между зубьями волновых передач//Волновые передачи: Сб. тр.–М.: Станкин, 1970.–С. 70–89. **8.** Косов М.Г. Некоторые контактные задачи теории упругости применительно к телам повышенной изгибной податливости// Волновые передачи: Сб. тр.– М.: Станкин, 1970.– С. 212– 229. **9.** Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости.- М.: «Наука», 1966.- 254 с. **10.** Рябов В.И. К вопросу о прочности гибкого элемента волновой передачи // Труды научн. конф. по итогам НИР Марийского гос. техн. ун-та.- Секц. Технол., оборуд., конструкции, механика, материалы.- Марийск. гос. техн. ун-т. Йошкар - Ола. - 2000. - С. 26. - Деп. в ВИНТИ 29.06.2000, № 1845-В2000. **11.** Лейбензон Л.С. Вариационные методы решения задач теории упругости.- М.: Гостехиздат, 1943.- 217 с. **12.** Тимошенко С.П., Войновский - Кригер С. Пластинки и оболочки.-М.:«Наука», 1966.- 635 с. **13.** Косов М.Г., Королёв В.А. Расчёт напряжённо - деформированного состояния колоколообразной оболочки герметичной волновой передачи // Волновые передачи: Сб. тр. – М.: Станкин, 1978. – Вып. 4. - С. 21 - 62. **14.** Пугачёв И.А. Определение статических нагрузок, действующих на зубчатых передачах, при одновременном зацеплении нескольких пар зубьев // Труды ЦИАМ. - 1962. - № 253.- С. 27 –32. **15.** Руденко В.Н. К расчёту гибких элементов герметичных волновых передач // Механизмы горных машин. - М.: «Недра».- 1966.- С. 21 – 27. **16.** Ting L., Yuan S.W. On Radial Deflection of a Cylinder Finite Length With Various End Conditions «Journal of the Aeronautical», «Sciences», V. 25, № 4, 1958. **17.** Косова Н.В., Цейтлин Н.И. Исследование напряжённого состояния зубчатого венца гибкого колеса волновой передачи // Волновые передачи: Сб. тр. – М.: Станкин, 1975. – С. 88 – 98.

Сдано в редакцию 24.05.07

## **СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ РЕЗАНИИ**

**Христафорян С.Ш., Христафорян Э.С., Тер-Петросян А.Т., Артунян А.В.**  
(ГИУА, HARVAL ENGINEERING, г. Ереван, Республика Армения)

*The physical model of shift in the region of cutting, based on the principles of self-organizing material structures in the space of the compressive stresses, is developed on the basis of the special features of the process of the plastic deformation of material in the region of cutting. The developed model makes it possible to give the adequate description of all processes of the plastic deformation of material structures.*

Теория резания пока не обладает адекватной физической моделью, описывающей процесс стружкообразования, и прогнозировать, тем более, управлять процессом образования структуры стружки при пластическом деформировании материала (ПДМ) методами резания нет возможности, а известные приближенные модели этого процесса (сдвиг по плоскости, вееру плоскостей и др.) исчерпали себя решив ограниченное чис-

ло практических задач, тогда как современное отношение к задачам металлообработки требует явно активное вмешательство в покой, царящий вокруг модели процесса резания, т.к. актуальны во всех отношениях вопросы совершенствования процессов резания в машиностроении. Не часто на процесс резания удается воздействовать направленно и то за счет результатов, накопленных практикой резания. О реальном направленном воздействии на процессы можно говорить, когда определена физика процесса, его особенности и внутренние связи, т.е. внутренняя проблема, и несмотря на успешное применение процессов резания и ПДМ в практике главный вопрос теории резания остаётся открытым. Проблема в том, что при внедрении клинообразного тела в материал в нём формируется некоторая область, где происходит сложный физический процесс структурирования стружки с присущими ей свойствами, а монополия в формировании этой области и стружки при ПДМ полностью принадлежит обрабатываемому материалу.

Рассмотрим задачу взаимодействия ансамблей в материале в поле сжимающих напряжений, в итоге чего формируются область резания и ограничивающий её поверхностный слой - сингулярная оболочка, удерживающая в ней деформируемый материал и где он под действием высокого давления претерпевает условный фазовый переход и условия, при которых напряжения сжатия вызывают сдвиг или кооперированно направленное перемещение ансамблей в объеме области резания [1]. Впервые для решения этих задач привлечены основные положения теории образования, самоорганизации и эволюции структур, что позволило разработать физическую модель процесса ПДМ резанием, включающую предшествующие все модели, как частные случаи. Существенно, что при формоизменении и пространственном структурировании материала и в нём самоорганизуется структура “устройства” переработки сырья, определяемая как “зона резания”, которая за счет притока вещества и энергии формирует стружку или “производит” продукт, отличающийся более высоким уровнем порядка и меньшим числом степеней свободы параметров (рис.1.). Примеров таких процессов множество, когда имея исходный материал за счет различных функциональных устройств и технологий и затрате энергии производится продукт. Как правило они созидающие, а устройства создаются специально соответственно целям. При резания такое устройство самоорганизуется в материале без нашего участия, причем каждый раз явно целесообразным образом, поэтому самовозникающаяся структура области резания должна подчиняться наиболее общим законам материального мира, а закон, описывающий её должен быть свободен от ограничений и быть общим для любого случая резания, при любом сочетании параметров.

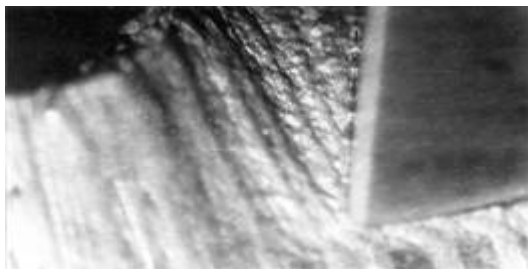


Рис. 1. Область резания или переработки вещества”

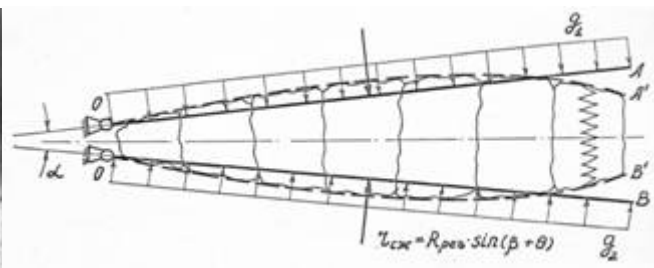


Рис. 2. Деформирование конического канала “зона под действием распределенной нагрузки  $g_1$  и  $g_2$ ”

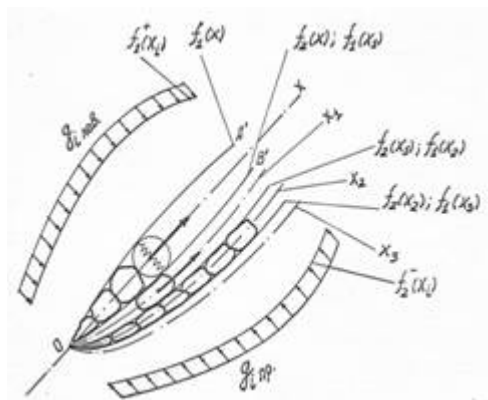


Рис.3. Конфигурация области резания, основанная на сингулярности оболочки, при равновесии относительно оси симметрии области OX

Принятые на сегодня физические модели ПДМ в области резания основаны на плоскостях сдвига, характерных для искусственных объемов и хрупкого разрушения. В природе объемы ограничены поверхностями и естественно, для выявления основных соотношений зоны резания пользоваться ими как более общим понятием трехмерного пространства, поэтому в основу разработанной физической модели процесса ПДМ при резании взято взаимодействие через поверхности, что несомненно справедливо, если учесть известный факт, что зона резания ограничена криволинейными поверхностями.

Заметим, принятые модели никак не описывают отмеченную оболочку области резания и её сингулярность, поэтому этот вопрос исследователями вообще не рассматривался, а такой важный факт, как процесс самоопределения направления схода стружки в области резания, ранее принимался как само собой разумеющийся [1]. Отмеченные вопросы взаимосвязаны и поэтому механика процесса ПДМ должна основываться на единственно приемлемом для этих условий законе материального мира.

Допустим упругие ансамбли находятся в сужающемся канале АООВ составленном упругими стенками и извне на стенки канала действуют напряжения сжатия (рис.2), тогда, разумеется, канал и ансамбли в ней деформируясь в завершении примут вид двоякосужающегося криволинейного канала А'ООВ'. Сам канал может вытянуться и на выходе из канала образуется особая структура составляющих оболочку области резания ансамблей, что обеспечит возможность удержать их в канале [1]. Допуская, что вершины каналов совмещены с режущей кромкой клина, а центральным направлен в направлении условной плоскости сдвига, зона резания составленная множеством каналов примет вид, показанный на рис.3. Ось центрального канала OX прямолинейна, а остальных нет, и на ансамбли будут действовать позиционные силы связанные с её координатой.

Обсудим условия образования и эволюции области резания пользуясь анализом [1, 2] структуры сингулярной оболочки. Форма кривых  $f_2^-(x_i)$  обусловлена взаимодействием ансамблей прибывшим в зону резания материалом, сопротивлением сходу стружки, глубиной залегания ансамбля в материале, их упругостью и условиями трения. Обозначим ансамбли соседних каналов через  $i_n^-$  в сторону схода стружки и  $i_n^+$  со стороны входящего в область ПДМ. Для ансамблей  $i_n^-$  характер кривой  $f_2^-(x_i)$  зависит от упругих свойств ансамблей в области ПДМ и сил, обусловленных сопротивлением сходу стружки. За характеристику этой границы области ПДМ можно принять условие, что за ней ПДМ отсутствует, а для  $f_1^+(x_i)$  условие, что над ПДМ не началось, а за ней ансамбли материала претерпевают ощутимую деформацию. В реальности о конкретике границ судить трудно, но можно считать, что в контакте ансамблей  $i_n^+$  и  $i_{n+1}^+$  наступит напряженное состояние, достаточное для характеристики положений кривых  $f_1^+(x_i)$  и  $f_2^-(x_i)$ , что позволит оценить деформации области резания в итоге взаимодействий с обрабатываемым материалом и стружкой.

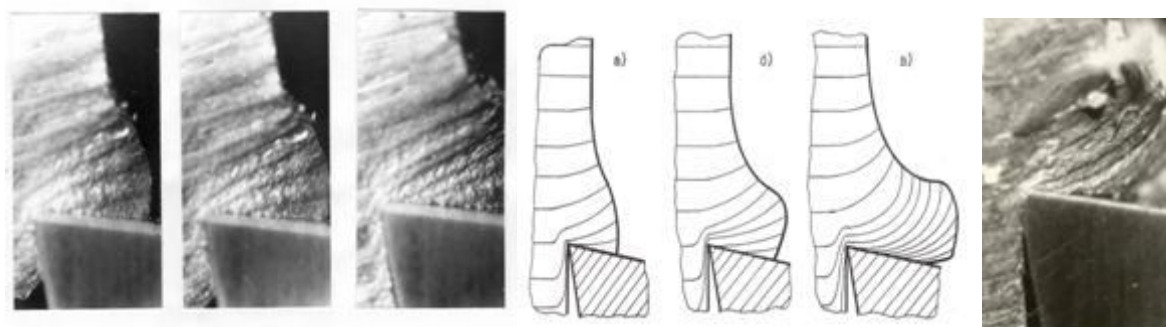
Деформируемые в плоском сужающемся канале с достаточно малым углом  $\alpha \neq 0$  ансамбли будут в состоянии придти в равновесие после сжатия и сдвига, что явно видно на рис.2. Примем его за канал, направленный по оси ОХ и рассмотрим некоторые особенности области резания отметив, что в реальности прямолинейной оси ОХ в области резания быть не может, т.к. в итоге взаимодействия поступающего на резание материала, стружки на передней грани клина и упругопластической области резания теоретическая ось ОХ претерпит деформацию и ось канала станет криволинейным. Ранее рассмотрены модель взаимодействия ансамблей и механизм их кооперативного поведения в области резания и было установлено, что физической моделью взаимодействия ансамблей материала при ПДМ в области резания является, скорее всего, модель упругого элемента в составленном подобными элементами сужающемся канале, позволившая объяснить удивительное по отклику воздействие УЗ на зону резания и ряд проблем теории резания, что допускает возможность исследования и отмеченных выше вопросов [4]. Трудно обнаружить условия, ограничивающие возможность образования какой-либо структуры в объеме ПДМ и вводящие строгие ограничения на конфигурацию образованной структуры, особенно если она образуется в процессе самоорганизации [2,3,4].

Допустим обрабатываемый материал слоистый с толщиной равной размеру ансамбля ПДМ и они расположены к направлению резания перпендикулярно. Анализ деформирования этой конфигурации по условиям резания и микрофотографии области резания, позволяют составить картину последовательных этапов формирования тектоники, скорее, архитектуры области резания, три из которых вполне определенно раскрывают процесс возникновения и эволюции структуры области резания и выбора направления схода стружки, что однозначно подтверждает результаты теоретических исследований, разработанную ранее физическую модель ПДМ в процессе резания [2,4] и положение о возникновении в начале ПДМ при резании сингулярной оболочки области структурирования материала в итоге протекающих в нём самоорганизационных явлений (рис.4).

Рассмотрим структуру области резания с позиций поведения ансамбля материала, попавшего в область резания и подвергаемого упругопластической деформации, когда он находится в соседстве с другими, а взаимодействие с ними приводит к упругопластическим деформациям и сдвигу в пространстве области резания. Реально сдвиг ансамбля происходит не по плоскости, а по поверхности имеющей кривизну, следовательно конфигурация области резания предстанет как веер поверхностей сдвига, по которым во всем объеме области резания происходит кооперированный сдвиг материала. Если рассмотреть область резания во всем объеме при несвободном резании, когда каждая из режущих кромок создает свой веер поверхностей сдвига, то область резания предстанет пересечением вееров поверхностей сдвига различных зон деформирования у режущих кромок и видимо будет проявляться в сечении, перпендикулярном к направлению резания, как нечто сотовое. При этом применение для анализа области резания каких-то плоскостей и поверхностей теряет смысл, а конфигурацией определяющей область резания может быть лишь пакет пространственных двоякосужающихся каналов. Траектория сдвига ансамбля материала в зоне резания в окружении себе подобных предстанет пространственной кривой, а изменение формы ансамблей после ПДМ будет обусловлено траекторией и степенью взаимодействия с соседними (микрофотографии шлифов стружек и зоны резания не выявляют в них поверхностей, близких к плоскости).

Анализ огромного объема известных данных по изучению стружки, обработанной поверхности, корней стружек, текстуры и микротвердости прирезцовых зон области резания и др, полученных исследователями указывает, что в зависимости от координаты ансамбля в области резания явно меняются его степень деформированности, геометрические параметры, форма траектории его перемещения,

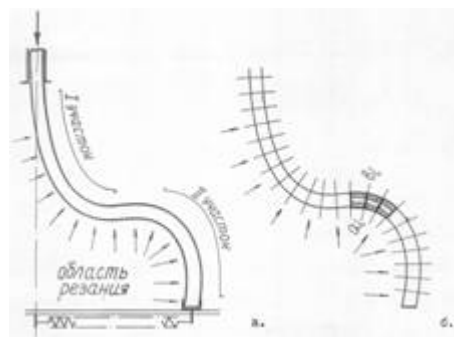
и др., свидетельствующие, что ПДМ ансамблей происходит под действием позиционных сил, нелинейно связанных с координатой, т.е. форма ПДМ ансамбля определяется его координатой в сужающемся канале - глубиной его залегания под поверхностью или линией тока по которой он про-ходит в области ПДМ, а линейные зависимости и плоскости никоим образом не могут обеспечить существование самой области резания в наблюдаемой нами форме.



1)

2)

3)



4)

Рис. 4. Фрагменты: регистрации процесса самообразования области резания (4.1); графических интерпретаций (4.2); сдвигов в сформированной области резания (4.3), свидетельствующие об уширении образующейся стружки; графоанализ образования сходящейся структуры арки в поверхностном слое области резания (4,4), определяющий динамику взаимодействий ансамблей материала в области резания

Допустим влияющие на силы факторы, зависящие от времени, в малом промежутке времени не существенны, тогда приращение силы будет зависеть лишь от обобщенной координаты, а позиционные силы будут консервативными и восстанавливающими. Как отмечалось [3] обеспечивающая эти условия для упругого ансамбля и сжимающих напряжений физическая структура может быть представлена как упругий элемент в сужающемся канале и при этом на него будет действовать позиционная сила  $F$  равная

$$F = 4 \cdot c \cdot \int_0^x [f(x)]^2 \cdot dx ,$$

где  $f(x)$ -функция, описывающая стенку симметричного канала,  $c$  - жесткость ансамбля.

Для сужающегося канала с прямолинейными стенками сила  $F_1$  для вталкивания ансамбля в канал и сила  $F_2$ , необходимая для выталкивания из неё зависят от координаты упругого элемента  $X$  и коэффициента трения  $f$

$$F = 4 \cdot c \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot x / (1 - f \cdot \operatorname{tg} \alpha); F_2 = 4 \cdot c \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot (1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot x / (1 + f \cdot \operatorname{tg} \alpha).$$

Действие силы сопротивления переменное и зависит от положения системы (позиционное трение). Если стенки сужающегося канала несимметричны, позиционная сила, действующая на элемент и стремящая вытолкнуть его из сужающегося канала будет

$$F = 4 \cdot c \int_0^x f_1(x) \cdot f_2(x) dx; \quad F_1 - F_2 = 4 \cdot c \cdot x \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha = 4 \cdot c \cdot x_1 \cdot \operatorname{tg}^2 [\alpha(x_1)] ,$$

где  $\alpha(x_1)$  - угол между касательными к стенкам канала  $f_1(x_1)$  и  $f_2(x_1)$  в контактах элемента со стенками в данный момент времени. Важно, что если есть структура сужающийся канал, то направление сдвига упругого элемента в нем строго определено и при достаточных напряжениях сжатия направленный сдвиг его неизбежен и для его осуществления нужны лишь напряжения сжатия. Такая структура явно расширяет возможности анализа процессов резания и ПДМ вообще.

При резании скорость потока вещества в области ПДМ существенна, а кривизна каналов, особенно у лезвия клина, ощутима и на движение элементов материала в канале будут влиять различные факторы, например центробежная сила, действующая при его движении по криволинейной траектории. Возможны два случая - ансамбль выталкивается в итоге сжатия канала и его вталкивают, тогда сила действующая на ансамбль будет

$$P'; P'' = (2c \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha \pm mV^2/r)(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot \operatorname{tg} \alpha / (1 - f \cdot \operatorname{tg} \alpha) \text{ и} \\ P = P' + P'' = 4c \cdot x \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha) / (1 - f \cdot \operatorname{tg} \alpha),$$

заметим, что эта зависимость аналогична отмеченной, но здесь сила  $P$  сумма неравных составляющих  $P'$  и  $P''$ , обусловленных тем, что ансамбль движется по траектории с радиусом кривизны в данной точке её  $r$  и на его центр тяжести действует центробежная сила и момент

$$M = (P' - P'') \cdot D \cdot \varepsilon / 2 = D \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot mV^2 (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha) / 2r(1 - f \cdot \operatorname{tg} \alpha),$$

где  $\varepsilon$  - величина упругой деформации ансамбля в направлении радиуса кривизны канала в данной точке оси,  $m$ ;  $D$  и  $V$  - масса, диаметр и скорость ансамбля в канале. Логично принять для движения условие, когда контакт со стенками канала осуществляется всегда через точки  $A$  и  $B$  и нет предпосылок, что при движении ансамбль в канале будет вращаться. Следовательно, кривизна канала в данной точке, разность сил и момент взаимосвязаны и  $\Delta P / D \cdot \varepsilon = P / r = 4c \cdot x \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha (1 - f / \operatorname{tg} \alpha) / \operatorname{tg} \alpha$ , после преобразований

$$D \cdot \varepsilon \cdot mV^2 \operatorname{tg} \alpha \cdot (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha) / r(1 - f \cdot \operatorname{tg} \alpha) = 4c \cdot x \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot D^2 \cdot \varepsilon^2 (1 - f / \operatorname{tg} \alpha) / 2r,$$

$$\text{и} \quad V = \sqrt{2c \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot D \cdot \varepsilon \cdot (1 - f / \operatorname{tg} \alpha) \cdot (1 - f \cdot \operatorname{tg} \alpha) / m(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha)},$$

т.е. скорость перемещения ансамбля в сужающемся канале определима, если известны параметры канала и его свойства. В случае, когда достаточная для перемещения сила сжатия элемента выталкивает его из канала с прямолинейной осью, а канал непрерывно замыкается за ним, то независимо от смещения ансамбля величина сжимающей силы неизменна и он перемещается под действием суммы сил

$$F_x = 2( (2c \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \alpha / \cos \alpha) - 2c \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot f ) = 4c \cdot x \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha (1 - f / \operatorname{tg} \alpha).$$

Анализ зависимости показывает, что условием движения элемента в канале является  $0 \leq f / \operatorname{tg} \alpha \leq 1$ . При  $f \geq \operatorname{tg} \alpha$  движение не реализуемо или угол  $\alpha$  должен быть больше  $\operatorname{arctg} f$ . Если  $\operatorname{tg} \alpha \geq f$ , то на элемент в сужающемся канале будет действовать некоторая сила  $F$  и элемент будет перемещаться с ускорением. При  $f = \operatorname{tg} \alpha$  будет условие перемещения с постоянной скоростью. Заметим, для реализации движения любого объема материала относительно соседних надо обеспечить для его двух поверхностей определенную разориентацию иначе сдвиг не произойдет, т.е. вообще для ПДМ, в том числе в области резания, сдвиг произойдет если две наиболее разориентированные поверхности ансамбля составят такой канал, что развиваемая в нем сила выталкивания преодолет силы сопротивления, при этом логически определятся направление и траектория сдвига и, в конечном итоге, объем сдвигаемого материала. Описанный способ перемещения ре-

ален и можно найти множество примеров материального мира подобного метода транспортировки - за счет сил сжатия и сужающих структур. Полученный результат допускает возможность анализа особенностей стружкообразования в более сложных процессах резания: несвободное резание, резание с криволинейной кромкой клина, зубообработка и др. и при шабрени [5], когда круговая режущая кромка расположена под меняющимся углом к направлению резания, но, как показывает практика теории резания, в закономерностях стружкообразования необходимо, в первую очередь, определиться для случая свободного резания.

Пользуясь методикой исследования процессов пластического деформирования материала слоистых образцов проведены и исследования по определению механизма пластического деформирования материала различными способами (волочение, прокатка, обжимка и др.), итоги которого показали, что во всех случаях в деформируемом материале наводятся сужающиеся структуры с параметрами, зависящими от параметров системы деформирования [4]. Таким образом, модель пластического деформирования материала можно свести к следующему - в процессе деформирования материала группа рядом расположенных его ансамблей создают для центрального условия подобные сужающемуся каналу и под действием напряжений сжатия формируется сила, вызывающая сдвиг его относительно соседних и т.к. в таких условиях находятся все ансамбли данного объема, происходит кооперированный сдвиг, а структура каналов сдвига в области деформирования материала – ячеистый пакет каналов. Здесь приведена часть результатов общего исследования вопросов реологии резания, относящиеся к вопросу физической модели и механики области пластического деформирования материала самоорганизуемого процесса резания. Рассмотрены некоторые аспекты физической модели сужающийся канал с упругим элементом и сформулирована модель взаимодействия ансамблей материала при пластическом деформировании, что позволило пересмотреть положения теории резания с позиций науки о самоорганизации и эволюции структур [6,7].

**Список литературы:** 1. Христафорян С.Ш., Саакян С.Г., Христафорян Э.С. Особенности структуры свободной поверхности области деформирования материала при резании. Межд.сб.науч.тр. – Донецк: ДонГУ, 2007, Вып.33, С.318-322. 2. Христафорян С.Ш. Влияние УЗК на процесс пластического деформирования при высоких скоростях резания. //Эл-физ и эл -хим методы обработки,-М.; НИИМАШ,-1983, N4,с.9-12. 3. М.В. Касьян, С.Ш. Христафорян. К вопросу о механизме возникновения структуры резания. //Изв. ВУЗ-ов, машиностроение, -М.; -1990, N2, с.121-124. 4. Христафорян С.Ш. Теоретические и технологические основы повышения эффективности обработки материалов использованием УЗК. //Автореф.на соиск.уч.ст. д.т.н.,-Ереван,-1996. 5. Христафорян Э.С. Повышение эффективности процесса шабрени использованием УЗК. //Автореф.на соиск.уч. ст. к.т.н., -Ереван,-1998. 6. Пригожин И. От существующего к возникающему.-М.: Наука.1985.-327 с. 7. Христафорян С.Ш. О процессе резания материалов как самоорганизующейся структуре по переработке вещества. //Изв.НАН РА, сер. ТН, 1999, том 2, -с.145-152.

Сдано в редакцию 04.05.07