

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕМЕНТНОГО СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ РЕЗАНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*А.А. Ласуков, к.т.н., доц., П.А. Чазов, аспирант, А.В. Барсук, студент*

*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета*

*652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451) 6-22-48*

*E-mail: lasukow@rambler.ru*

Типу сходящей стружки при резании металлов уделено достаточно большое внимание исследователей. Однако данный вопрос на сегодняшний момент до конца не изучен. Поэтому вопрос образования того или иного вида стружки находится в центре внимания современных исследователей процесса обработки металлов резанием. Механизм формирования стружки и морфология стружки являются ключевой информацией о процессе обработки, качестве обработанной на станке поверхности, стойкости инструмента и эффективности его использования, затратах энергии при обработке материалов [1]. Изучение данных вопросов позволит также решать вопросы обрабатываемости специальных сталей и сплавов. К примеру в работе [1] указывается, что по виду образующейся стружки (обнаружение момента перехода от сливной к элементной стружке) можно своевременно обнаружить критический износ инструмента и произвести его замену, что может способствовать увеличению скорости резания до 50 % и сокращению производственных затрат на 10÷40 %.

Тип стружки определяется режимами резания, геометрией инструмента, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. В рамках данной работы исследования проводились при наружном продольном точении жаропрочных и титановых сплавов в широком диапазоне изменения режимов резания ( $t=3$ мм). Данные материалы широко применяются в современном машиностроении, однако обработка таких материалов связана с определенными трудностями [6]. Изучение процесса стружкообразования проводилось при непосредственном наблюдении за процессом резания, а также анализировалась макроскопическая и микроскопическая структура стружки.

Наблюдения за процессом резания показывают, что в большинстве случаев при точении жаропрочных сплавов получается стружка, по внешнему виду трудно отличимая от сливной. Однако изучение микрофотографий показало, что, начиная с самых малых скоростей резания, стружка имеет трещины, которые разделяют её на элементы, хотя и не распространяются на всю толщину стружки. При этом зона вторичной деформации в контактном слое стружки четко не отделена от зоны основной деформации, линии текстуры искривлены по всему деформированному объему (рис. 1,а). С повышением скорости резания трещины удлиняются в сторону контактного слоя стружки: деление на элементы становится более четким и стружка приобретает вид, показанный на рис. 1,б. Степень деформации металла в основном объеме элемента мала. Механизм образования стружки при высоких скоростях резания, отличается от механизма образования на малых скоростях резания. При высоких скоростях резания адиабатный сдвиг – доминирующий процесс деформации, который имеет место в основной зоне резания (зона первичных деформаций) [7]. Его основная характеристика – тонкая лента явной деформации в зоне сдвига. Появление адиабатной полосы сдвига на высоких скоростях резания увеличивает износ инструмента, таким образом, влияя на качество обработанной поверхности обрабатываемой детали. С другой стороны, это явление полезно, потому что при нем получается элементная стружка, которая легко ломается и облегчает ее удаление из зоны резания, что удобно при автоматизированной обработке. Переходу псевдосливной стружки в элементную при обработке жаропрочных сплавов способствуют увеличение толщины среза, скорости резания и уменьшение переднего угла инструмента. В подтверждение проведенных исследований аналогичные результаты были получены в работе [2] при обработке закаленной стали.

При этом для сливных стружек основными характеристиками стружкообразования являются усадка стружки и угол наклона условной плоскости сдвига -  $\beta_1$ . Элементное стружкообразование характеризуется большим числом угловых и линейных параметров, к которым относятся: угол наклона плоскости сдвига (скола) элемента -  $\beta_1$ , толщина стружки (высота элемента) –  $a_1$ , высота сплошного участка стружки -  $a_2$ , толщина элемента -  $b_1$ , шаг элемента –  $m$ , пилообразная высота  $h_{cp}$  [3, 2]. В зависимости от величины основных параметров находятся и другие характеристики, отражающие особенности элементных стружек. Отношение  $a_2/a_1$  характеризует сплошность стружки. Угол между свободной поверхностью элемента и направлением скорости резания -  $\psi$  (рис.2), может харак-

теризовать сдвиговые деформации. Эти характеристики легко фиксируются на стружке и отражают конечную стадию деформации элементов.

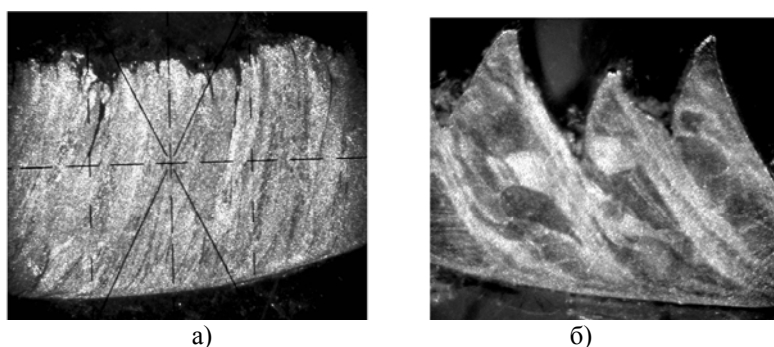


Рис. 1. Стружка, полученная при обработке жаропрочного сплава ЭИ 698 при  $\gamma=+7^\circ$ :  
а)  $V=5\text{м/мин}$ , б)  $V=20\text{м/мин}$

На рис. 2 изображена упрощенная схема образования элементной стружки, которая с достаточной точностью позволяет установить связь между угловыми и линейными параметрами стружки [3].

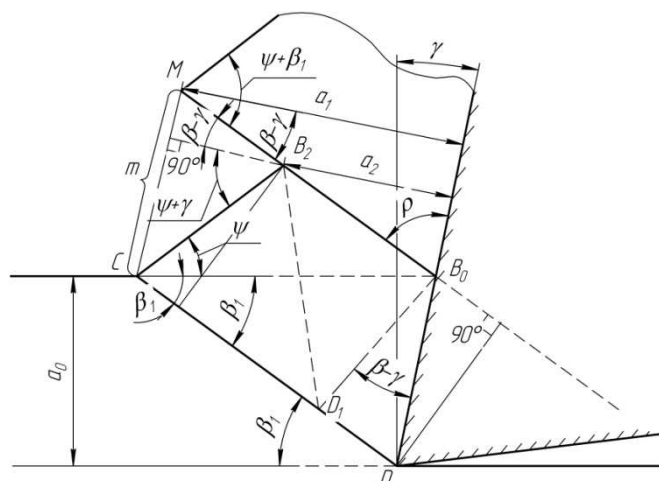


Рис. 2. Упрощенная схема образования элементной стружки

Микроанализ шлифов стружек позволил получить значения показателей деформации и геометрических параметров элементных стружек в зависимости от режимов резания.

Наиболее простым способом оценки деформации стружки считается усадка стружки. Однако при элементном стружкообразовании продольная усадка стружки имеет заниженные значения, особенно при больших подачах инструмента [4].

Для элементной стружки удобно использовать для оценки деформации угол сдвига  $\beta_1$  в момент конечного скола элемента, который является одной из важных характеристик стружкообразования, поэтому его целесообразно использовать как основной параметр процесса стружкообразования [8].

В данной работе угол скола элементов определяли по микрофотографиям стружек путем измерения стороны DC элемента (рис.2). Деформация этой стороны при образовании элемента незначительна и выражается лишь в небольшом искривлении ее прирезцової части. Если обозначить длину указанной стороны через  $\ell$ , то:

$$\beta_1 = \arcsin \frac{a_0}{\ell}. \quad (1)$$

Преимущество данного способа состоит в том, что непосредственное измерение угла  $\beta_1$  заменяется измерением длины  $\ell$ , которое выполняется на шлифе стружки, а не на корне, что снижает трудоемкость обработки результатов. Точность данного метода вычисления угла  $\beta_1$  удовлетворительна [3].

На рис. 3 видно, что с увеличением подачи и скорости резания угол  $\beta_1$  для труднообрабатываемых материалов повышается. При увеличении пластичности сплава степень деформации элемента увеличивается, что выражается в уменьшении угла  $\beta_1$  и соответствующем увеличении плоскости сдвига. Такая же картина наблюдается в опытах со сталью [2].

Из этого следует, что угол сдвига элемента  $\beta_1$  показывает существующую сложную связь явлений в процессе обработки материалов. Однако он фиксирует лишь окончательную стадию деформации и не отражает ее внутри элемента.

График зависимости сплошности стружки от скорости резания и подачи с фотографиями стружки для жаропрочного сплава представлен на рис. 4. При повышении подачи и скорости резания сливная стружка переходит к стружке скалывания (сплошность стружки уменьшается), но подача влияет на сплошность стружки сильнее, чем изменение скорости резания. Такая ситуация по мнению авторов [1, 2] приводит к повышенному износу инструмента.

Изменение шага элементов  $m$  от скорости резания (рис.6) отражает более сложную картину контактных процессов. При образовании элементной (суставчатой) стружки наблюдается нестабильное состояние в зоне сдвига элементов, которое связано с периодическим изменением напряжений сжатия, растяжения и напряжений сдвига, и нестабильность в зоне вторичных деформаций, обусловленная процессом трения и схватывания в контактном слое [12]. На шаг элементов скорость резания оказывает незначительное влияние. Шаг больше зависит от подачи и от свойств обрабатываемого материала. С увеличением подачи шаг элементов растет, но еще больше он растет с увеличением механических свойств обрабатываемого материала. При этом шаг элементов зачастую связывают с появлением вибраций при обработке, связывая частоту появления элементов с частотой возникающих вибраций [1, 2].

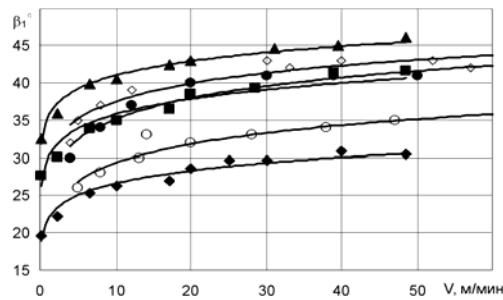


Рис. 3. Изменение угла сдвига элементов:

титановые сплавы  $\gamma=+10^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$   $\diamond$ -BT3-1  $S=0,265\text{мм/об}$ ;  $\bullet$  - BT6  $S=0,265\text{мм/об}$ ;  $\circ$  - BT1  $S=0,265\text{мм/об}$ ; сплав ЭИ698  $\gamma=+7^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $\varphi=75^\circ$   $\blacktriangle$  -  $S=0,36\text{мм/об}$ ;  $\blacksquare$  -  $S=0,26\text{мм/об}$ ;  $\blacklozenge$  -  $S=0,1\text{мм/об}$

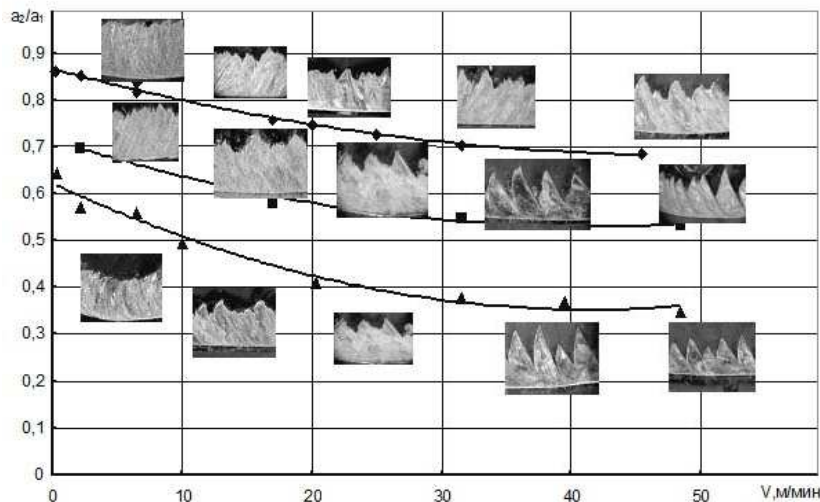


Рис. 5. Зависимость сплошности стружки от скорости резания для сплава ЭИ698 ( $\gamma=+7^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $t=3\text{мм}$ ):  $\blacklozenge$  -  $S=0.1\text{мм/об}$ ;  $\blacksquare$  -  $S=0.26\text{мм/об}$ ;  $\blacktriangle$  -  $S=0,36\text{мм/об}$

Угол  $\beta_1$ , шаг элементов –  $m$  и сплошность стружки –  $a_2/a_1$  определяются физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, геометрией инструмента, режимами резания и контактными явлениями на передней поверхности.

Толщина среза (подача) достаточно сложно влияет на процесс стружкообразования. С увеличением толщины среза увеличивается зона стружкообразования: увеличивается длина условной плоскости сдвига, увеличивается площадь контакта стружки с инструментом по передней грани.

Увеличение толщины среза приводит к росту угла  $\beta_1$ , растет шаг элементов  $m$  за счет увеличения объема деформации. Однако при этом сплошность стружки (отношение  $a_2/a_1$ ) уменьшается, что приводит к переходу сливных стружек к элементным.

О влиянии толщины среза на стружкообразование существует несколько гипотез, объясняющих это влияние, но единого мнения до сих пор нет.

Н.Н. Зорев объясняет данный переход (сливная стружка в элементную) с увеличением толщины среза как результат снижения пластичности обрабатываемого материала, вызванный изменением напряженного состояния зоны стружкообразования [8]. Аналогичных взглядов придерживаются Филд и Мерчант [14].

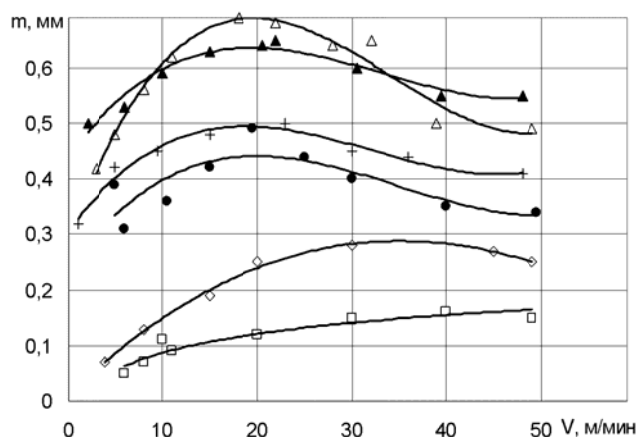


Рис. 6. Зависимость шага элементов стружки от скорости резания (BK8):  
сплав ВТ1  $\gamma=+10^\circ$ ,  $\varphi=70^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$   $\square$  -  $S=0,265$ мм/об,  $\diamond$  -  $S=0,37$ мм/об;  
сплав ЭИ698  $\gamma=+7^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$   $\bullet$  -  $S=0,26$ мм/об,  $\blacktriangle$  -  $S=0,36$ мм/об;  
сплав ВТ3-1  $\gamma=+10^\circ$ ,  $\varphi=70^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$   $+$  -  $S=0,26$ мм/об,  $\Delta$  -  $S=0,37$ мм/об

Ингоро Н.Е. и Оксли П.Л., исследуя напряжения в пластической зоне на основе теории поля линий скольжения, выявили, что гидростатическое напряжение изменяется от напряжения сжатия у свободной поверхности до напряжений растяжения у вершины резца. Эти напряжения увеличиваются с ростом толщины среза. Это обстоятельство указывает на то, что образование стружки скалывания зависит от величины напряжений растяжения вблизи режущей кромки инструмента, что приводит к появлению трещины в обрабатываемом материале. На возникновение опережающей трещины указывают и другие исследователи процесса резания материалов [10, 5].

Толщина среза влияет на стружкообразования через напряженное состояние в контактной зоне стружки с передней поверхностью инструмента. Увеличение толщины среза приводит к росту нормальной силы и силы трения на передней поверхности инструмента. При этом рост нормальной составляющей опережает рост силы трения. Так как с увеличением толщины среза (подачи) площадь контакта на передней поверхности инструмента растет не пропорционально толщине среза, то среднее контактное давление увеличивается, а среднее касательное напряжение остается практически постоянным [9, 11, 3], поэтому средний коэффициент трения уменьшается. Увеличение нормальных напряжений в контактной области ведет к росту напряжений сжатия у свободной поверхности стружки и напряжений растяжения у вершины резца.

В общем случае увеличение толщины среза приводит к снижению напряженности деформационного процесса. Об этом говорит рост угла  $\beta_1$ , снижение среднего коэффициента трения, уменьшение поперечной усадки стружки.

Процессе стружкообразования довольно чувствителен к скорости резания. Механизм влияния скорости резания достаточно сложен. При обработке жаропрочных сплавов экспериментально выявить непосредственное влияние скорости затруднительно. Это связано с воздействием на процесс резания многих параметров: температура резания, контактные явления на поверхностях инструмента и износ инструмента (особенно, если учитывать взаимовлияние износа и процесса стружкообразования [1, 2]), проявление которых очень сильно связано с ростом скорости резания.

Увеличение скорости резания при обработке жаропрочных сплавов, в общем, способствует образованию элементных стружек, что в значительной мере отличает процесс резания этих сплавов от процесса резания конструкционных сталей и многих цветных металлов и сплавов.

При повышении скорости резания угол скола элементов  $\beta_1$  увеличивается, сплошность стружки уменьшается. Шаг элементов в зависимости от скорости резания отражает более сложную картину происходящих процессов в зоне стружкообразования и на контактных поверхностях инструмента. Шаг же элемента стружки, изначально увеличиваясь, достигает некоторого максимума, а затем с дальнейшим увеличением скорости начинает уменьшаться. Чем пластичнее сплав, тем выше уровень скоростей, при которых шаг стружки достигает максимума. Одной из причин такого поведения материала в процессе резания является, возможно, повышенная чувствительность исследуемых сплавов к скорости деформации. Скорость же резания – основной параметр, который и определяет скорость деформации материала срезаемого слоя.

Кроме описанного влияния скорости резания стружкообразование также зависит от ряда вторичных явлений: температура резания, физико-химические превращения, контактные явления и др.

Рассмотренные явления при резании труднообрабатываемых сплавов отражают лишь часть тех сложных зависимостей, которые существуют и действуют одновременно. Анализ экспериментальных данных отражает в основном качественную картину процесса пластической деформации при резании труднообрабатываемых материалов на разных режимах.

#### Литература.

1. Aco Anti, Petar B. Petrovi, Milan Zeljkovi, Borut Kosec, Janko Hodoli The influence of tool wear on the chip-forming mechanism and tool vibrations. *Materials and technology* 46 (2012) 3, 279–285.
2. Aco Antić, Dražan Kozak, Borut Kosec, Goran Šimunović, Tomislav Šarić, Dušan Kovačević, Robert Čep Influence of tool wear on the mechanism of chips segmentation and tool vibrations. *Tehnički vjesnik* 20, 1(2013), 105-112.
3. Афонасов А.И. Контактные явления и износ инструмента при резании титановых сплавов: Дисс. канд. техн. наук. Томск, 1969. – 300с.
4. Афонасов А.И., Ласуков А.А. Процесс элементного стружкообразования. // *Вестник машиностроения*. – 2013. – №12. – С.69-72.
5. Barry J., Gerald B., The Mechanisms of Chip Formation in Machining Hardened Steels, *Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 124 (3), pp. 528–535, 2002.
6. Верещака А.С., Аникеев А.И. Повышение эффективности резания труднообрабатываемых материалов с применением инструмента с наноструктурированным износостойким покрытием // *Технология машиностроения*, 2010. №3. – С.17-22.
7. Guohe L.; Minjie W.; Chunzheng D. Adiabatic shear critical condition in the high-speed cutting. // *Journal of Material Processing Technology*, 209, (2009), pp. 1362-1367.
8. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956.- 368с.
9. Зорев Н.Н. О взаимозависимости процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента// *Вестник машиностроения*, № 12, 1963. – С.42-50.
10. Kopac J., Sokovic M., Dolinsek S., Tribology of Coated Tools in Conventional and HSC Machining, *Journal of Materials Processing Technology* 118 (2001), pp. 377–384.
11. Полетика М.Ф., Афонасов А.И. Оптимизация режимов черного и получистового точения сплава ЭИ 698// *Оптимизация процессов резания жаропрочных и особопроочных материалов. Межвузовский сборник, выпуск II. Уфа, 1977. – с.57-62.*
12. Полетика М.Ф., Афонасов А.И., Ласуков А.А. Некоторые закономерности элементного стружкообразования при резании металлов // *Известия ТПУ*, т. 305, вып.1, Томск 2002. с34-41.
13. Резников Н.И., Зайцев В.М. и др. Производительная обработка нержавеющей жаропрочных материалов. М.: Машгиз, 1960.
14. Field M. and Merchant M.E. Mechanic of Formation of the Discontinuous chip in Metal Cutting. *Trans. ASME*, vol.41, 1949.