

УДК 621.9.01

М.Ф. ПОЛЕТИКА, А.И. АФОНАСОВ, А.А. ЛАСУКОВ

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕМЕНТНОГО СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

Рассмотрены некоторые результаты многолетних исследований процесса резания жаропрочных и титановых сплавов, которые проводились в Томском политехническом университете.

В условиях большого разнообразия современных материалов, используемых в машиностроении и приборостроении, в процессе обработки резанием которых образуется несколько разновидностей элементных стружек, различающихся внешним и внутренним строением элементов и прочностью их связи друг с другом.

Как известно, основными параметрами, определяющими вид элементной стружки и ее переход в сливную стружку, являются свойства обрабатываемого материала, геометрия передней поверхности лезвия, толщина среза и температурно-скоростной фактор. Влияние последнего на характеристики элементного стружкообразования весьма существенно и позволяет, в частности, разделить весь диапазон изменения скорости резания на две части: низкотемпературный (микроскорости) и высокотемпературный. В настоящей статье рассматриваются закономерности стружкообразования, присущие высокотемпературным элементным стружкам, к которым мы условно относим все стружки, возникающие при температуре резания выше комнатной. В статье использованы как данные опытов авторов, так и результаты обобщения данных других исследователей. Из анализа литературы следует, что наиболее полное, на наш взгляд, исследование механики процесса резания малопластичных металлов было проведено Ю.А.Розенбергом [1].

С применением в промышленности жаропрочных и титановых сплавов, при резании которых образуется элементная стружка, были развернуты работы по исследованию процессов деформирования и разрушения при стружкообразовании и формировании поверхностных слоев (Клушин М.И., Романов К.Ф., Резников Н.И., Кривоухов В.А., Макаров А.Д., Талантов Н.В. и др.). Подобные исследования проводились учеными и в других странах (Мерчант М.Е., Филд М., Янг Н., Командури Р. и др.). В этих исследованиях использовались самые разные методики, аппаратура, теории пластического течения и деформации, теплофизический анализ. Результаты этих исследований позволили описать процесс элементного стружкообразования как процесс периодический.

Образование элементной стружки есть в основном процесс плоской деформации – деформации сдвига. Конечный сдвиг или скол элемента происходит при напряжении, равном пределу текучести на сдвиг упрочненного до предела металла. В процессе образования одного элемента происходит деформация металла последующего элемента. Поверхность конечного сдвига элемента близка по своей форме к плоскости.

Высказано много гипотез, объясняющих механизм элементного стружкообразования при резании титановых сплавов.

Рядом исследователей (Дроздов Н.А., Каширин А.И., Кудинов В.А. и др.) показано, что элементный процесс стружкообразования является причиной автоколебаний механизмов станка. Колебания силы резания с частотой сдвиговых процессов способствуют ухудшению качества обработанной поверхности. Это влияние проявляется в увеличении шероховатости поверхности и ее неоднородности, в характере распределения напряжений в поверхностном слое.

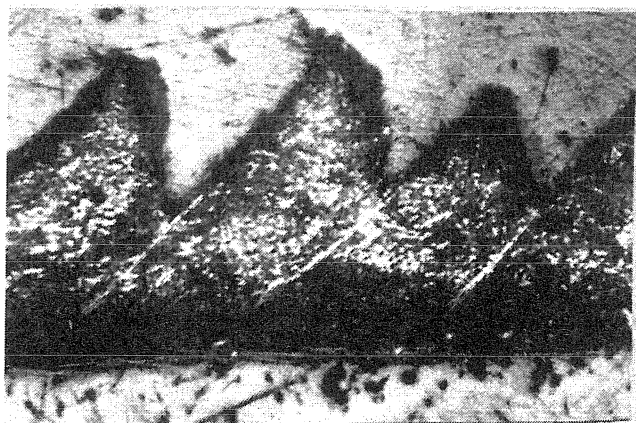


Рис.1. Вид стружки, образующейся при резании титановых сплавов на оптимальных режимах

условий резания. Аналогичные результаты Л.С. Сеченовой и др.

Ниже излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния свойств жаропрочных и титановых сплавов, режимов резания на контактные характеристики элементного стружкообразования.

В процессе исследований изучалось поведение следующих параметров стружкообразования: угла скола элемента Φ , длины пластического контакта стружки с передней поверхностью C_1 , полной длины контакта C , средних контактных нагрузок q_F и q_N на передней поверхности, длины контакта на задней поверхности инструмента (фаска на задней поверхности), касательных и нормальных нагрузок на задней поверхности τ_{h3} и σ_{h3} .

Изучалось распределение контактных напряжений по длине контакта на задней поверхности инструмента, а также по длине режущей кромки. Замерялась средняя температура контакта. Измерялись геометрические параметры элементных стружек: шаг элементов m , толщина стружек по выступам a_1 и толщина сплошного слоя стружки a_2 . В этих исследованиях использовались разнообразные методики и аппаратура.

Длина пластического и упругого контактов определялась по следам контакта на рабочих поверхностях инструмента, на корнях стружек, методом разрезного резца и по методике С.В.Михайлова (а/с 1514484). Угол скола Φ измерялся на корнях стружек, через специальный микроскоп и на шлифах стружек. Составляющие силы резания измерялись трехкомпонентными токарными динамометрами с тензодатчиками.

Распределение контактных напряжений исследовалось методом разрезного резца с использованием жесткого и высо-

Появляющиеся микротрещины, зазубрины и вырывы на обработанной поверхности являются концентраторами напряжений и значительно снижают надежность и долговечность деталей машин [2]. Есть публикации, в которых авторы указывают на положительные моменты процесса элементного стружкообразования. Так в статье Ю.А.Розенберга, А.Н.Зеленского и А.К.Назарова [3] показано, что интенсивность износа инструмента по задней поверхности значительно меньше, когда в процессе резания имело место образование элементной стружки. Справедливость этого положения ими проверена в довольно широком диапазоне полученных и в работах А.Д.Макарова,

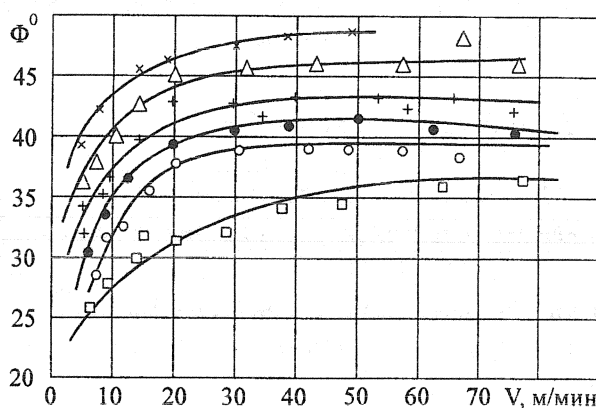


Рис.2. Влияние скорости резания и подачи на угол скола элементов: резец BK8 с $\gamma=+10^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$; сплав BT3-1 $\circ$ - $S=0,145$ мм/об; $+$ - $S=0,265$; Δ - $S=0,37$; $\times$ - $S=0,47$ мм/об; сплав BT-6 - $\bullet$ - $S=0,265$ мм/об; сплав BT1 - $\square$ - $S=0,265$ мм/об

кочувствительного четырехкомпонентного динамометра типа «разрезной резец» [4].

Температура резания измерялась методом естественной термопары. Геометрические параметры стружки измерялись на шлифах стружек и корнях стружек.

В качестве режущего инструмента применялись резцы с механическим креплением пластин из твердого сплава марки ВК8, ВК4.

Механическое крепление пластин твердого сплава в специальных державках обеспечивало изменение геометрии режущего лезвия в следующих пределах: γ от 0° до $+10^\circ$, $\alpha=10^\circ$, φ от 45° до 75° , $\lambda=0^\circ$.

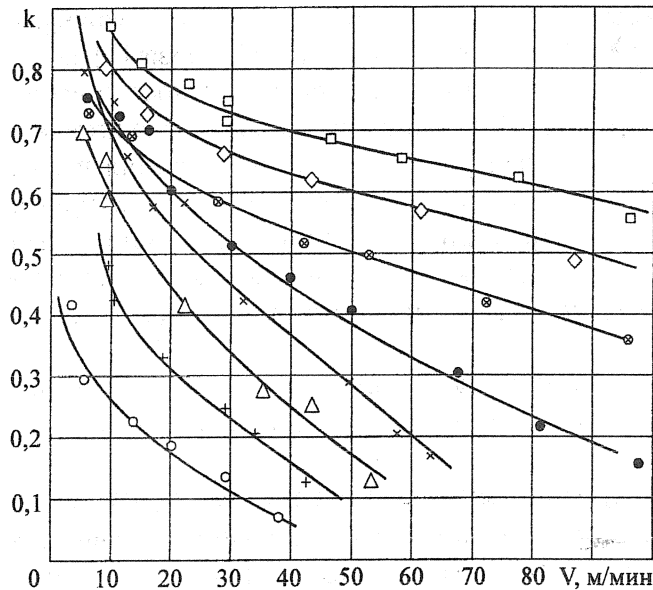


Рис.3. Влияние скорости резания и подачи на показатель сплошности: сплав ВТ1, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\square$ - $S=0,265$ мм/об; $\diamond$ - $S=0,37$ мм/об; $\otimes$ - $S=0,47$ мм/об; сплав ЭИ698, резец ВК8 с $\gamma=+8^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\bullet$ - $S=0,26$ мм/об; сплав ВТ3-1, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\circ$ - $S=0,145$ мм/об, $+$ - $S=0,265$ мм/об, Δ - $S=0,37$ мм/об, $\times$ - $S=0,47$ мм/об

характеристика сплошности $k = \frac{a_2}{a_1}$.

На рис. 2, 3, 4 представлены экспериментальные данные, показывающие зависимость названных параметров от условий резания.

Из данных (рис.2, 3) следует, что с увеличением скорости, толщины среза и механических свойств обрабатываемых материалов угол Φ растет, а показатель сплошности k , напротив, уменьшается – стружка приобретает все более выраженный элементный характер.

Зависимость шага элементов m от скорости резания отражает более сложную картину происходящих процессов в зоне стружкообразования и на контактных поверхностях. При образовании суставчатой стружки имеет место нестабильность в зоне сдвига элементов, связанная с периодическим изменением напряжений сжатия, растяжения и напряжений сдвига, и нестабильность в зоне вторичной деформации, обусловленная процессом трения и схватывания в контактном слое.

Режимы резания изменялись в следующих диапазонах: скорость резания V от 5 м/мин до 100 м/мин, подача S от 0,1 мм/об до 0,47 мм/об, глубина резания t от 1 до 3 мм. Обрабатываемые материалы – титановые сплавы марки ВТ1, ВТ3-1, ВТ6, ОТ4 и жаропрочный сплав ЭИ698 (ХН73МБТЮ). Выбор этих сплавов обусловлен известной склонностью к элементному стружкообразованию.

При резании титановых и жаропрочных сплавов на оптимальных режимах резания типичным является образование стружки с относительно прочной связью между элементами. На рис.1 показана стружка, характерная при резании титановых и жаропрочных сплавов на оптимальных режимах. В дальнейшем подобный вид стружек будем называть суставчатыми.

При элементном стружкообразовании основными параметрами, характеризующими деформацию, являются угол скола элемента Φ , шаг элементов m , ха-

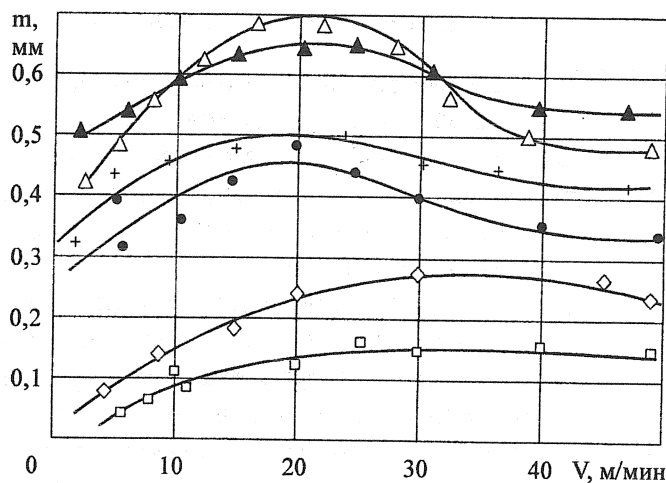


Рис.4. Влияние скорости резания и подачи на шаг элементов стружки: сплав ВТ1, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\square$ - $S=0,265$ мм/об; $\diamond$ - $S=0,37$ мм/об; сплав ЭИ698, резец с $\gamma=+80^\circ$, $\varphi=450^\circ$, $\alpha=100^\circ$; $\bullet$ - $S=0,26$ мм/об, $\blacktriangle$ - $S=0,36$ мм/об; сплав ВТ3-1, резец с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $+$ - $S=0,26$ мм/об, Δ - $S=0,37$ мм/об

несколько элементов.

Измерения длины упругого и пластического контактов, шага элементов показывают, что в зависимости от механических характеристик обрабатываемых материалов, режимов резания, переднего угла инструмента в контакте с передней поверхностью может находиться до 3х элементов и более (рис.5).

Отношения длины пластического контакта к полной длине контакта меняется в пределах от 0,3 до 0,8 (рис.6). Это отношение тем меньше, чем менее пластичен обрабатываемый материал. Существенно уменьшается оно с повышением скорости резания и увеличением переднего угла инструмента.

Причины такого изменения величины $\frac{C_1}{C}$ кроются в том, что с ростом

скорости резания и снижением пластичности обрабатываемого материала уменьшается величина показателя сплошности k . При этом, естественно, уменьшается и толщина a_1 сплошного слоя и, как следствие, уменьшается жесткость стружки.

С увеличением скорости резания растет температура, которая приведет к разупрочнению металла в зонах деформации и, как следствие, к снижению сопротивления пластическому деформированию. Вследствие этих процессов изменяется характер стружкообразования. На рис.4 показано влияние скорости резания и свойств обрабатываемого материала на характер элементного стружкообразования, который выражается через шаг элементов m .

При стружкообразовании высокотемпературных элементных стружек контактный слой выполняет роль «арматуры», обеспечивающей определенную прочность связи элементов друг с другом. В этих условиях длина контакта превышает длину формирующегося элемента, то есть в контакте с передней поверхностью одновременно находятся

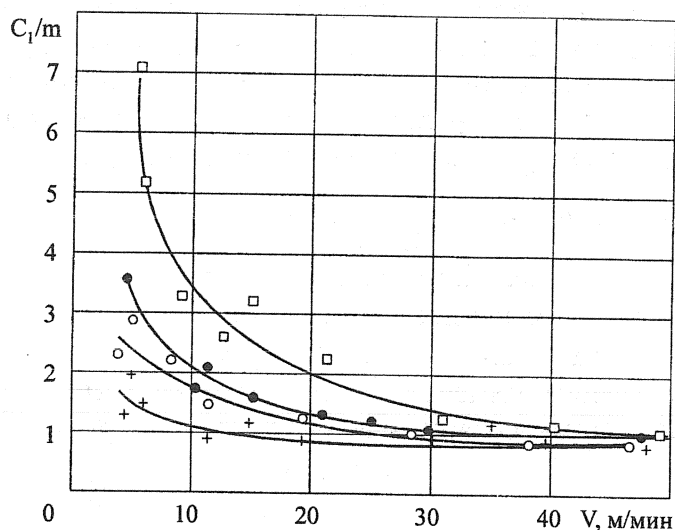


Рис.5. Влияние скорости резания на отношение длины пластического контакта к шагу элементов: сплав ВТ1, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\square$ - $S=0,265$ мм/об; сплав ВТ6, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\circ$ - $S=0,265$ мм/об; сплав ЭИ698, резец ВК8 с $\gamma=+18^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\bullet$ - $S=0,26$ мм/об, сплав ВТ3-1, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $+$ - $S=0,265$ мм/об

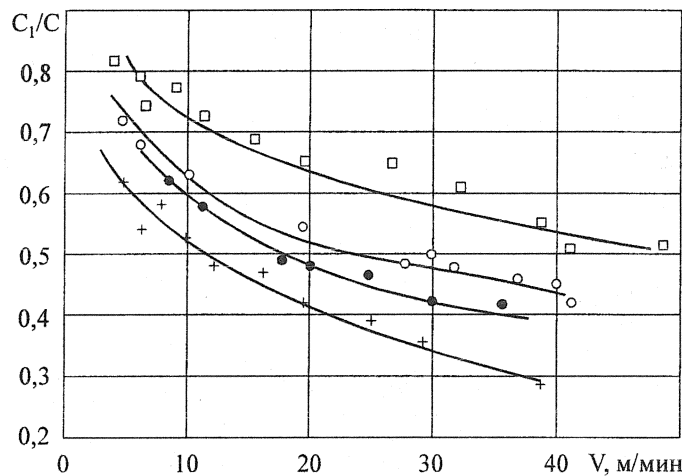


Рис.6. Влияние скорости резания на отношение длины пластического контакта к общей длине контакта стружки с резцом: сплав ВТ1, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\square$ - $S=0,265$ мм/об; сплав ВТ6, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\circ$ - $S=0,265$ мм/об; сплав ЭИ698, резец ВК8 с $\gamma=+8^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $\bullet$ - $S=0,26$ мм/об, сплав ВТ3-1, резец ВК8 с $\gamma=+10^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $+$ - $S=0,265$ мм/об

Зависимость отношения $\frac{C_1}{C}$ от

скорости резания связана еще с другой особенностью титановых сплавов – очень высокой активностью титана по отношению к атмосферным газам. Температурно-скоростной фактор усиливает эту активность.

Исследования распределения контактных напряжений на передней поверхности инструмента при резании титановых сплавов показали, что в отличие от сливного стружкообразования, когда кривая контактных давлений имеет четко выраженную горизонтальную площадку, при резании малопластичных материалов, в том числе и титановых сплавов, эта кривая плавно снижается от режущей кромки к границе контакта стружки с резцом [4].

На рис.7 показаны эпюры контактных напряжений на передней поверхности при резании титанового сплава ОТ4 на скорости, обеспечивающей среднюю контактную температуру порядка 500° .

Для анализа связей между явлениями в зоне сдвигов и в контакте на передней поверхности инструмента необходимо знать координату центра давления на передней грани. Имея эпюры контактных давлений, нетрудно путем их обмеров определить координату точки приложения нормальной силы, т.е. положение центра давления стружки на резец.

Для эпюр нормальных контактных напряжений, полученных при резании титанового сплава ОТ4, относительная координата центра давления равна $\frac{C_0}{C} = 0,26 \div 0,28$.

При известной координате центра давления на передней поверхности можно определить точку приложения силы N_Φ на плоскости скалывания элемента. Так из схемы элементарного стружкообразования (рис.8) следует, что

$$\ell_0 = C_0 \frac{\cos(\omega + \gamma)}{\sin(\omega + \Phi)}, \quad (1)$$

откуда несложно найти, что относительное расстояние точки приложения силы N_Φ от режущей кромки будет равно

$$\frac{\ell_0}{\ell} = \frac{C_0}{a} \cdot \frac{\sin \Phi \cdot \cos(\omega + \gamma)}{\sin(\omega + \Phi)}. \quad (2)$$

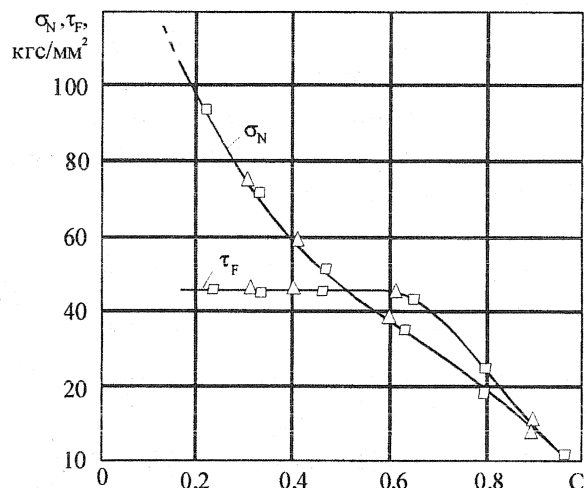


Рис.7. Эпюры контактных напряжений на передней поверхности инструмента: сплав ОТ4, $V=4,4$ м/мин; $a=0,2-0,32$ мм; $b=1,5$ мм

Используя описанные выше экспериментальные данные и приняв $\frac{C_0}{C} = 0,27$, были произведены расчеты по формулам (1) и (2), результаты которых приведены в таблице.

Анализ таблицы показывает, что при переходе от относительно вязкого сплава ВТ1 к малопластичному сплаву ВТЗ-1 точка приложения силы N_Φ резко смещается к режущей кромке. Подобное смещение, но слабое, наблюдается при увеличении толщины среза и при повышении скорости резания. Следует отметить, что в расчетах координата центра давления принималась неизменной. По опытным данным В.А.Красильникова [4] получается, что с ростом скорости резания центр давления смещается к режущей кромке. Если учесть этот факт, то влияние скорости будет гораздо существеннее.

Таблица

Определение координаты ℓ_0 приложения нормальной силы N_Φ в плоскости
скола элемента

Марка сплава и инструмента	Толщина среза а, мм	Скорость реза- ния V, м/мин	Координата C_0 , мм	Координата ℓ_0 , мм	Относительная координата $\frac{\ell_0}{\ell}$
Сплав ВТ1 Резец ВК4	0,249	20	0,167	0,192	0,488
		40	0,154	0,187	0,473
		80	0,140	0,173	0,465
		120	0,135	0,168	0,460
Сплав ВТ1 Резец ВК4	0,431	20	0,248	0,291	0,398
		40	0,215	0,262	0,387
		80	0,185	0,231	0,367
		120	0,158	0,197	0,330
Сплав ВТЗ-1 Резец ВК8	0,178	10	0,073	0,067	0,248
		20	0,069	0,065	0,230
		30	0,065	0,062	0,224
		40	0,060	0,058	0,220

Смещение точки приложения силы N_Φ вдоль плоскости скалывания свидетельствует об изменении характера распределения нормальных напряжений на этой плоскости. Известные экспериментальные данные [5] о закономерностях этих напряжений противоречат между собой, что связано и с несовершенством методов их определения и, в еще большей степени, в неодинаковости эпюр нормальных напряжений, полученных в различных условиях резания. Тем не менее, можно утверждать, что при столь значительном уменьшении величины $\frac{\ell_0}{\ell}$, которое следует из таблицы, уровень сжимающих напряжений у свободной поверхности зоны резания будет намного меньше, чем у режущей кромки.

Расчеты, выполненные применительно к контактным условиям в предположении линейной эпюры нормальных напряжений на плоскости скалывания, показали, что уже при $\frac{\ell_0}{\ell} < 0,4$, вблизи наружной поверхности зоны резания нормальные напряжения становятся растягивающими.

Наличие растягивающих или незначительно высоких сжимающих напряжений у наружной поверхности зоны резания приводит к тому, что трещины и другие дефекты, неизбежно возникающие при больших пластических сдвигах, не заживают.

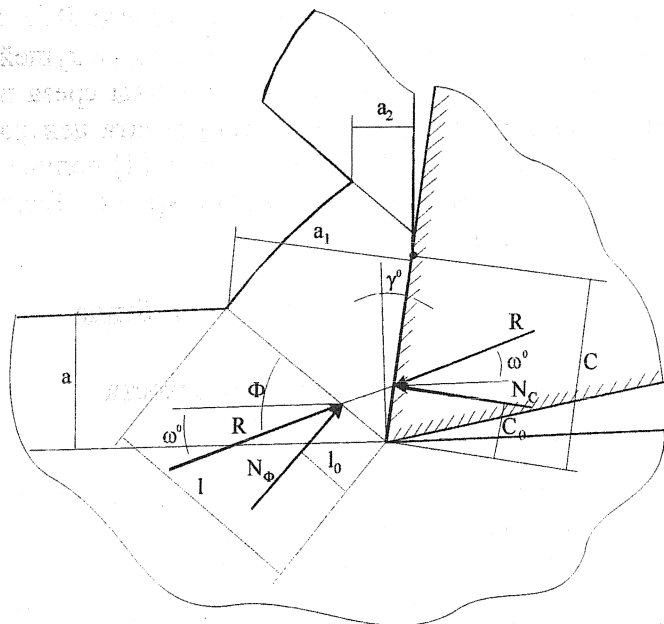


Рис.8. Схема действия нормальных сил N_ϕ и N_c при элементном стружкообразовании

Наличие высоких напряжений и изгибающего момента приводит к образованию трещины, а затем элемент начинает сдвигаться по площади скола. Совместный анализ кинокадров и контактных нагрузок [6] позволил получить картину изменения контактного давления по пути формирования элемента.

На определенной стадии формирования элемента наблюдается стабилизация контактного давления, которая сохраняется до выхода зоны пластической деформации на свободную поверхность. В момент скола элемента и перемещения его по плоскости скола контактное давление резко падает, но не до нуля. Контактное давление стабилизируется на этом низком уровне и начинается образование нового элемента.

Приведенные выше результаты исследований показывают, что в условиях

элементного стружкообразования контактные процессы на передней поверхности инструмента играют существенную роль. Однако целый ряд вопросов, касающихся механизма этого влияния, до сих пор остается без ответа и требует дополнительных экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резание металлов и инструмент/ Под ред. А. М. Розенберга. – М.: Машиностроение, 1964, 228 с.
2. Урывский Ф.П., Коротин Б.С. Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое при точении и шлифовании жаропрочной стали ЭН787 и титановых сплавов ВТЗ-1 и ВТ14. Высокопроизводительное резание в машиностроении. – М.: Наука, 1966. С.262-268.
3. Розенберг Ю.А., Зелинский А.Н., Назаров А.К. Исследование процесса образования сливной и элементной стружки при резании металлов// Труды Уральской Юбилейной научной сессии по итогам науч.-иссл. работ в области машиностроения. – Курган, 1969. С. 12-19.
4. Красильников В.А. Исследование контактных напряжений на передней поверхности резца при высоких скоростях резания: Дисс... канд.техн.наук. – Томск, ТПИ. 1973, 175 с.
5. Гольдшмидт М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов. – Томск: Изд-во STT, 2001, 180с.
6. Полетика М.Ф., Подворчан А.И. Изменение контактных нагрузок на передней поверхности инструмента в процессе формирования элементных стружек// Сб.науч.тр. «Развитие процессов резания и холодного пластического деформирования металлов». – Киев: 1994. С.23-25.

Томский политехнический университет