

11. Полетика М.Ф. Анализ напряженного состояния в контактном слое стружки при резании. -Сб. «Перспективы развития резания конструкционных материалов», -М.:ЦНТО МАШПРОМ, 1980, с. 18-22.
12. Poletika M. F., Pushnykh V. A. Contact Processing in cutting with cemented Carbod Tools.- Advanced Ceramic Tools for Machining application. III.xxx Tech Publications. Switzerland, 1998, p.p. 357-392.
13. Мальцев М.В., Барсукова Т.А., Борин Ф.А. Металлография цветных металлов и сплавов.-М., Металлургиздат, 1960, 372с.

Томский политехнический университет

УДК 621.9.02

М.Ф. ПОЛЕТИКА, В.А. ПУШНЫХ

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В КОНТАКТНОМ СЛОЕ СТРУЖКИ И ПЛОТНОСТЬ КОНТАКТА ПРИ СЛИВНОМ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ

Приводятся результаты исследования контактных параметров и их зависимость от условий резания. Подчеркивается роль длины контакта стружки с резцом как фактора, определяющего другие параметры контактных процессов. Представленные результаты могут стать основой для анализа процессов износа режущего инструмента.

В работе [1] одним из авторов настоящей статьи была предпринята попытка анализа напряжённого состояния в контактном слое стружки. Соответствующие расчеты были проведены на ограниченном экспериментальном материале, причем для их упрощения опытные кривые контактных нагрузок аппроксимировались ломаными прямыми. Эти об-

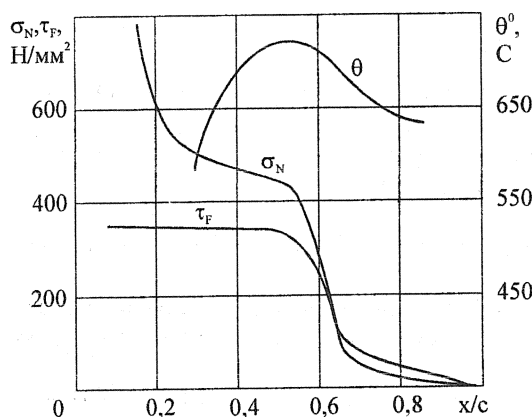


Рис.1. Распределение контактных нагрузок и температуры по длине контакта при резании стали 45 резцом из сплава ВК8: передний угол $\gamma=0^\circ$, толщина среза $a=0.1\text{мм}$, скорость резания $V=200\text{м/мин}$

стоятельства уменьшили значимость полученных в работе [1] результатов и воспрепятствовали их обобщению, что и побудило нас провести более глубокое исследование с применением тех же методических принципов, но на большем массиве экспериментальных данных и без промежуточной их аппроксимации, снижающей объективность результатов расчета. Методика и результаты этого исследования изложены ниже.

Как известно, основные экспериментальные данные о распределении контактных нагрузок на передней поверхности инструмента получены двумя методами: поляризационно-оптическим и методом разрезного резца. Для наших расчетов годились только те из них, которые были получены для стабильных контактных условий, исключаящих наростообразование (по нашей классификации [2] - контактные условия II и III типа).

Первый из названных методов этому требованию удовлетворяет, но может быть эффективно использован лишь для случая резания свинца. Второй - в принципе вполне универсален, но, к сожалению, во многих известных исследо-

ваниях реализован в температурно-скоростном диапазоне, характерном для нестабильных контактных условий. Исключением является работа [3], авторы которой проводили специальный контроль за стабильностью контактных условий. Поэтому за основу расчетов были в первую очередь использованы данные работы [3]. Типичные экспериментальные кривые из полученных в этой работе приведены на рис.1. Дополнительные данные были взяты из работ [4,5,6,7]. Всего анализу было подвергнуто 19 случаев резания. Соответствующие каждому из них экспериментальные кривые распределения по длине контакта нормальной σ_N и касательной τ_F контактных нагрузок были обработаны способом графического интегрирования непосредственно по экспериментальным точкам.

При рассмотрении напряжённого состояния в тонком контактном слое стружки были приняты следующие допущения:

- 1) стружка формируется по схеме с единственной плоскостью сдвига;
- 2) поперечное сечение стружки представляет собой правильный прямоугольник со сторонами $b_1 \times a_1$;
- 3) в контактном слое имеет место плоское напряжённое состояние;
- 4) напряжения в стружке, вызванные силой трения, распределяются по её толщине равномерно.

Непосредственно по найденным экспериментально контактным нагрузкам σ_N и τ_F определяются одно из нормальных σ_Y и касательное τ_{XY} напряжения

$$(\sigma_Y = -\sigma_N); \quad \tau_{XY} = \tau_F. \quad (1)$$

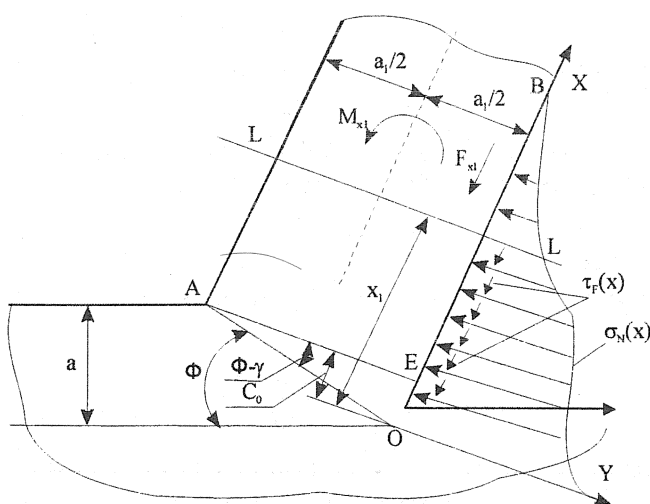


Рис.2. Схема нагружения контактного слоя стружки

Для определения второго нормального напряжения σ_X обратимся к схеме рис.2. Так как на участке контакта EB стружку можно рассматривать как консоль, закреплённую по AE и нагруженную распределёнными нормальной и касательной нагрузкам, то напряжение σ_X формируется в результате совместного действия вызванных этой загрузкой момента и продольной сжимающей силы.

Взяв произвольное поперечное сечение стружки LL с координатой $X = X_1$ и, отбрасывая в соответствии с принципом Сен-Венана часть стружки LLB, расположенную справа от сечения LL, найдём момент M_{X1} и силу F_{X1} , которые действуют на стружку со стороны отсечённой части

$$M_{X1} = b \int_{X_1}^{X=C} (X - X_1) \sigma_N(X) dX - a_1 b_1 / 2 \int_{X_1}^{X=C} \tau_F(X) dX, \quad (2)$$

$$F_{X1} = b_1 \int_{X_1}^{X=C} \tau_F(X) dX. \quad (3)$$

Согласно общей теории упруго-пластического изгиба (например, [10]), совмещенного с продольным сжатием, искомое напряжение σ_x в точке $X = X_1$ определится

$$\sigma_x = \frac{6M_{X1}}{b_1 a_1^2} - \frac{F_{X1}}{b_1 a_1}. \quad (4)$$

Определив по данным рис.2 методом графического интегрирования величины M_{X1} и F_{X1} для различных значений X_1 и, произведя расчеты по формуле (4), мы получили кривую изменения нормального напряжения σ_x по длине контакта, исключая жёсткий участок контакта ОЕ, для которого использование закономерностей упруго-пластического изгиба неправомерно. Результаты этих вычислений для условий рис.1 представлены на рис.3. Там же даны значения максимального касательного напряжения $\tau_{\max}$, подсчитанного по формуле

$$\tau_{\max} = (1/2)\sqrt{(\sigma_y - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \quad (5)$$

Как следует из рис.2, напряжение σ_x в пределах длины контакта меняет знак. Являясь отрицательным (сжимающим) на упругом участке контакта и возрастая, как и остальные компоненты напряжения, по мере приближения к режущей кромке, на пластическом участке, оно переходит через ноль, становясь положительным (растягивающим). С дальнейшим приближением к режущей кромке положительные значения σ_x быстро увеличиваются.

Подобный же эффект появления растягивающих напряжений σ_x был обнаружен во всех случаях резания стали, а также при резании меди и более слабый - при резании латуни. Экстраполировать положительные значения σ_x в жесткую часть контакта ОЕ, очевидно, нельзя, так как на участке ОЕ господствуют стеснённые условия деформации и уровень сжимающих напряжений должен быть выше. Поэтому приблизиться к режущей кромке, пользуясь тем же способом расчета, можно лишь за счёт уменьшения протяжённости жёсткой части контакта C_0 .

Величина C_0 определяется толщиной среза a , передним углом γ и углом наклона плоскости сдвига ϕ (рис.2)

$$C_0 = a_1 \operatorname{tg}(\phi - \gamma) = a \frac{\sin(\phi - \gamma)}{\sin(\phi)}. \quad (6)$$

Высокие требования к жёсткости динамометрического прибора не позволили сделать в работе [3] передний угол регулируемым: он во всех опытах был одинаков и равен нулю. Согласно формуле (6), этому соответствует значение $C_0 = a$ независимо от прочих условий опыта. Как следует из той же формулы, уменьшение C_0 может быть достигнуто за счёт увеличения переднего угла, которое как правило влечёт за собой и рост угла ϕ . Поэтому мы воспользовались данными работы [7] для случая с передним углом

$\gamma = 20^\circ$, которые лучше других соответствовали контактными условиям III типа. Подстановка в формулу (6) данных [7] для выбранного случая даёт $C_0 < 0$, что свидетельствует об отсут-

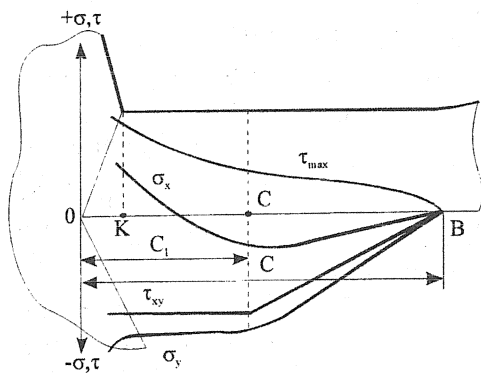


Рис.3. Распределение напряжений в контактном слое стружки, рассчитанных по экспериментальным данным рис. 1

ствии участка жёсткого контакта. По всей длине контакта инструмент взаимодействует с консольной частью стружки.

Результаты расчётов напряжений в контактном слое стружки для выбранного случая резания меди представлены на рис.4. Мы видим, что область растягивающих напряжений обнаруживается и в этом случае, причём простирается до самой режущей кромки.

Таким образом, можно считать установленным, что при III типе контактных условий и сливном стружкообразовании в контактном слое стружки вблизи режущей кромки формируется область растягивающих напряжений, занимающая часть пластического участка контакта, прилегающую к «месту заземления» консольной части стружки.

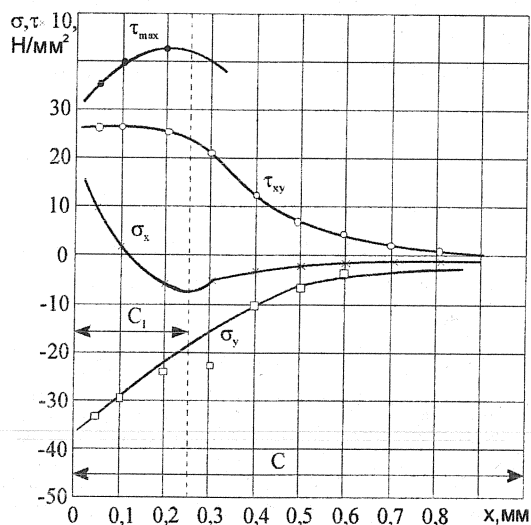


Рис.4. Изменение напряжений в контактном слое стружки при резании меди: ($\gamma=20^\circ$, $a=0,1\text{ мм}$, $V=50\text{ м/мин}$, $c=1\text{ мм}$)

В работе [3] для сопоставления данных методов разрезного резца и поляризационно-оптического были получены экспериментальные кривые контактных нагрузок при резании свинца с низкой и высокой скоростями резания. Анализ напряжённого состояния в контактном слое для этих случаев показал, что при резании свинца напряжение σ_x независимо от скорости резания остаётся сжимающим, сохраняя постоянную величину вдоль всего пластического участка контакта.

Аналогичные расчёты для кривых контактных нагрузок, полученных поляризационно-оптическим методом [4,5,6], показали, что в этих условиях напряжение σ_x не только остаётся сжимающим в пределах пластического участка контакта независимо от величины переднего угла, но и возрастает по абсолютной величине с приближением к режущей кромке.

Максимальное касательное напряжение $\tau_{\max}$ характеризует сопротивление деформации материала стружки и его изменение логичнее рассматривать в направлении движения стружки по резцу. Из рис.3 следует, что в пределах пластического участка контакта на пути от точки E к точке C величина $\tau_{\max}$, а, стало быть, и сопротивление деформации, уменьшается, что хорошо согласуется с кривой изменения температуры (рис.1) и, по-видимому, может быть объяснено именно влиянием температуры. Дальнейшее уменьшение $\tau_{\max}$ на упругом участке контакта естественно и вызывается упругой разгрузкой контакта.

Определение $\tau_{\max}$ для других случаев резания показало, что описанная тенденция изменения этой характеристики на пластическом участке контакта чётко прослеживается у стали и меди, слабее выражена у латуни и практически не обнаруживается при резании свинца.

Каждый элементарный объём контактного слоя стружки, перемещаясь в пределах пластического участка контакта, непрерывно деформируется и за счёт этого должен упрочняться. Одновременное повышение температуры движущегося объёма должно приводить к термическому разупрочнению. Прослеживаемое изменение сопротивления деформации есть результат совместного действия обоих названных процессов: деформационно-

го упрочнения и термического разупрочнения и зависит от очень многих факторов. В их числе механические и теплофизические свойства деформируемого материала, условия контакта и др. Имеющихся экспериментальных данных для анализа всех этих взаимосвязей недостаточно. Попытки такого анализа (главным образом, применительно к нестабильным контактным условиям) сделаны в работах [8, 9].

Плотность контакта может быть рассмотрена как некая самостоятельная контактная характеристика, заметно влияющая на характер и интенсивность контактных процессов при резании. Так, именно большей или меньшей плотностью контакта определяется возможность проникновения на контактную поверхность частиц среды: как воздушной, так и жидкостной. Плотность контакта, несомненно, влияет и на интенсивность износа инструмента, особенно, таких его видов как адгезионный и диффузионный.

Плотность контакта может быть оценена как отношение фактической (истинной) площади A_r к номинальной площади контакта A_0

$$\chi = \frac{A_r}{A_0}. \quad (7)$$

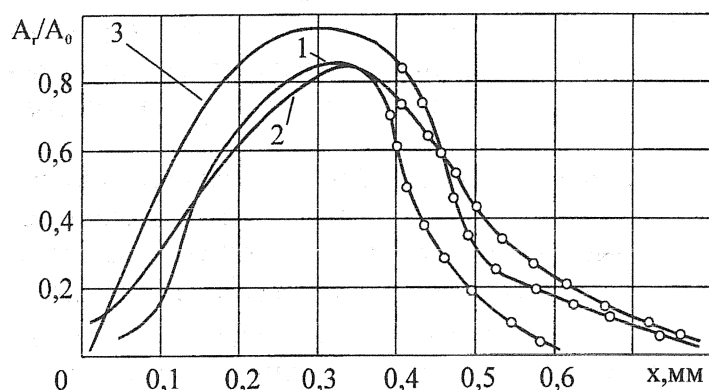


Рис.5. Изменение относительной площади контакта $\chi(X)$ по пути движения стружки при резании сталей, $\gamma=20^\circ$, $a=0,1$ мм: 1 - обрабатываемый материал - Сталь 45, инструментальный материал - BK8, $V=200$ м/мин, $s=0,65$ мм; 2 - обрабатываемый материал - Сталь 50, инструментальный материал - P18, $V=8$ м/мин, $s=0,85$ мм; 3 - обрабатываемый материал - Сталь 45, инструментальный материал - P18, $V=30$ м/мин, $s=0,85$ мм

В условиях контакта III типа, сопряженных с высокими скоростями и температурами резания, непосредственное измерение параметра χ чрезвычайно затруднено. Однако описанные выше результаты определения напряжений в контактном слое стружки позволяют оценить этот параметр косвенным путём.

Контактная поверхность стружки и передняя поверхность инструмента - это реальные шероховатые поверхности, взаимодействующие по вершинам микронеровностей. Фактическое их соприкосновение будет происходить на микроучастках ΔA_r , где образуется так называемые мостики схватывания, которые из-за непрерывного движения

стружки будут разрушаться с тем, чтобы сразу же возникнуть вновь.

Рассмотрим малый участок ΔX по длине контакта, имеющий координату X и номинальную площадь A_0 , равную

$$A_0 = b_1 \cdot \Delta X. \quad (8)$$

Действующая на этом участке сила трения равна:

$$F_{0X} = A_0 \cdot \tau_{FX}. \quad (9)$$

Эта сила состоит из двух частей: силы F_r , являющейся суммой элементарных сил, действующих на участке схватывания ΔA_r , и силы F' , действующей на остальной площади контакта. В пределах пластического участка контакта $F' < F_r$ и можно полагать $F_{0X} \approx F_{rX}$.

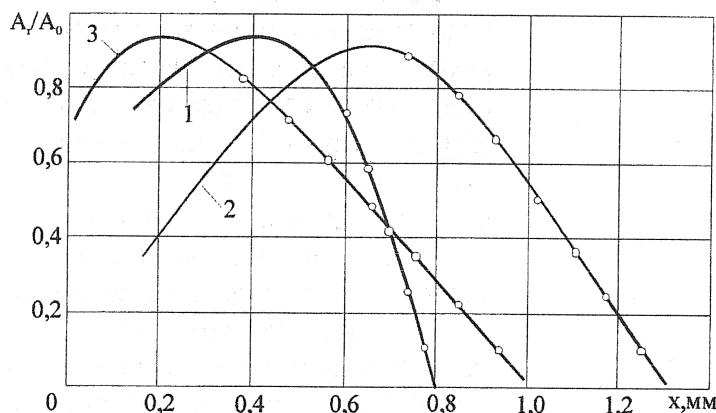


Рис.6. Изменение относительной площади контакта $\chi(X)$ по пути движения стружки при резании меди и латуни. Инструментальный материал - P18: 1 - обрабатываемый материал - латунь Л62, $a=0,2$ мм, $V=221$ м/мин, $s=0,8$ мм, $\gamma=0^\circ$; 2 - обрабатываемый материал - медь, $a=0,1$ мм, $V=200$ м/мин, $s=1,25$ мм, $\gamma=0^\circ$; 3 - обрабатываемый материал - медь, $a=0,1$ мм, $V=50$ м/мин, $s=1$ мм, $\gamma=20^\circ$

Поскольку разрушение мостиков схватывания происходит по материалу стружки как менее прочному, то напряжение их среза должно быть равно максимальному касательному напряжению $\tau_{\max}$ в рассматриваемой точке с координатой X . Обозначая сумму площадок ΔA_r в пределах выбранной площадки A_0 через A_r , получим

$$F_{rx} = A_r \cdot (\tau_{\max})_x, \quad (10)$$

откуда будем иметь

$$A_0 = \tau_{FX} = A_r \cdot (\tau_{\max})_x. \quad (11)$$

Из равенства (11) следует, что относительная площадь контакта $\chi(X)$ в каждой точке пластического участка контакта может быть выражена формулой:

$$\chi(X) = \frac{A_r}{A_0} = \frac{\tau_{FX}}{(\tau_{\max})_x}. \quad (12)$$

Результаты расчётов по этой формуле, выполненные для разных обрабатываемых материалов с использованием данных предыдущих расчётов, представлены на рис.5,6,7. Так как применение формулы (12) для точек, расположенных на упругом участке контакта неправомерно (соответствующие этим точкам значения $\tau_{\max}$ определяются упругой, а не пластической деформацией контактного слоя), то ветви кривых $\chi(X)$ для этого участка даны предположительно.

Анализ кривых $\chi(X)$ на рис.5, 6, 7 приводит к следующим выводам:

- 1) независимо от скорости резания и контактной температуры плотность контакта на пластическом участке не является стопроцентной: относительная площадь контакта на этом участке, как правило, меньше единицы и приближается к ней лишь в отдельных случаях резания такого пластичного материала как свинец;
- 2) величина $\chi(X)$, а, следо-

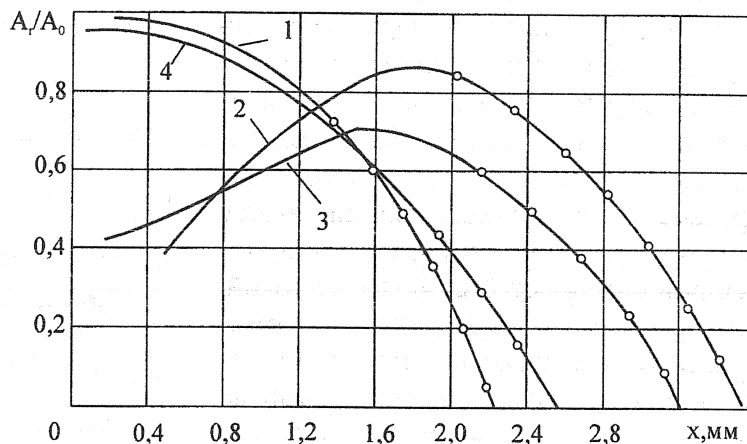


Рис.7. Изменение относительной площади контакта по пути движения стружки при резании свинца: 1 - $\gamma=0^\circ$, $a=0,49$ мм, $V=250$ м/мин, $s=2,3$ мм; 2 - $\gamma=0^\circ$, $a=0,76$ мм, $V=0,025$ м/мин., $s=3,5$ мм; 3 - $\gamma=-10^\circ$, $a=0,76$ мм, $V=0,025$ м/мин, $s=3,2$ мм; 4 - $\gamma=-20^\circ$, $a=0,76$ мм, $V=0,025$ м/мин, $s=2,5$ мм

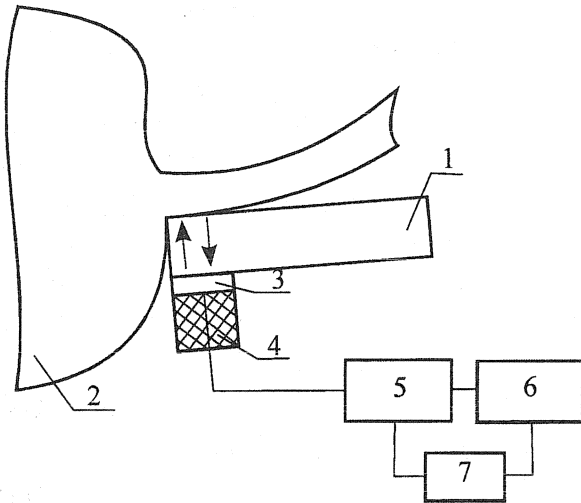


Рис.8. Схема измерения фактической площади контакта стружки с резцом ультразвуковым методом

гих специалистов убеждением о стопроцентной плотности контакта на пластическом участке при высоких и средних скоростях резания, когда основным управляющим фактором процесса стружкообразования является температура резания [8,9]. В связи с этим заметим следующее.

Указанное убеждение исходит, прежде всего, из данных общеизвестного способа фиксации зоны резания, когда на контактной поверхности стружки сохраняется (в пределах пластического контакта) отпечаток рисок передней поверхности. По нашему мнению, этот факт ещё ни о чём не говорит. В самом деле, в условиях высокого контактного давления пластически деформируемый материал стружки затекает во все щели и углубления, полностью заполняя их и образуя тем самым заторможенный слой, который может иметь дополнительные наслоения. Стружка в дальнейшем движется по этому слою. Возникает контакт шероховатых поверхностей однородных материалов, для которого остаются справедливыми все приведённые выше соотношения. При этом, несмотря на относительное движение, прочность нормальных связей между контактным слоем стружки и заторможенным слоем остаётся более высокой, чем прочность связей между заторможенными частицами и материалом инструмента. Поэтому при резком выводе инструмента из зоны резания заторможенный слой остаётся на стружке.

Таким образом, наблюдаемый отпечаток рисок инструмента на контактной поверхности стружки ещё не свидетельствует о стопроцентной плотности контакта на пластическом участке.

вательно, и плотность контакта, возрастает непрерывно на пути перемещения элементарного объёма контактного слоя, начиная от точки Е (рис.2) при $\gamma=0^0$ или от режущей кромки (медь, $\gamma=20^0$);

- 3) наибольших значений, близких к единице, плотность контакта достигает на границе пластического участка контакта с упругим;
- 4) плотность контакта в начале пути элементарного объёма контактного слоя по передней поверхности зависит от механических свойств материала стружки, возрастая с увеличением его пластичности.

Результаты, показанные на рис.5, 6, не согласуются с установившимся среди мно-

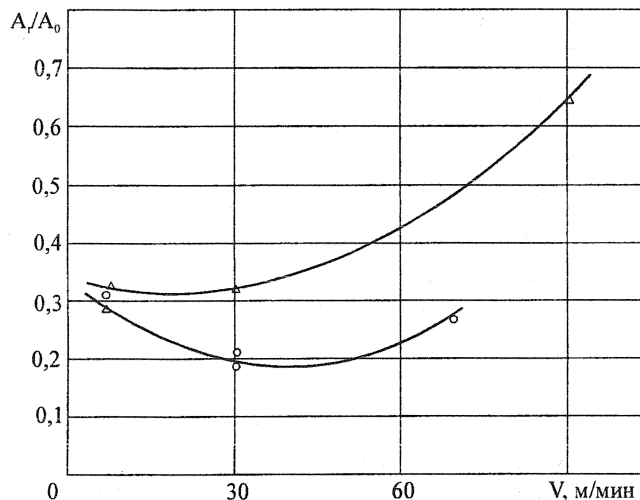


Рис.9. Зависимость относительной площади контакта стружки с резцом от скорости резания: Δ - $S=0,1$ мм/об; $\square$ - $S=0,2$ мм/об

Помимо оценки плотности контакта описанным выше косвенным методом была предпринята попытка определить относительную площадь контакта с помощью ультразвука. Измерение производилось непосредственно в процессе резания с помощью установки, включающей пьезокерамическую пластинку 3, являющуюся излучателем ультразвуковых волн, демпфер 4, электронный блок 5, анализатор импульсов 6 и генератор 7 (рис.8). Исследование проводилось на высоких частотах (5 МГц) эхоимпульсным методом. При этом электронный блок 5 служил для генерирования импульсов, возбуждающих пластинку 3, а также для выделения и усиления отражённых импульсов, анализатор 6 - для регистрации отражённых импульсов, генератор 7 - для синхронизации электронного блока и анализатора.

Резец 1 был оснащён пластинкой из сплава ВК8 с передним углом $\gamma = -5^\circ$. В качестве обрабатываемого материала была использована сталь 50. Результаты опытов представлены на рис.9. Сопоставить их с полученными косвенным методом при равных условиях невозможно из-за несовпадения пар инструмент - заготовка и режимов резания. Сопоставление при близких условиях (кривая для стали 50 на рис.9 и значения A_r/A_0 , взятые на рис.5 для $V = 8$ м/мин) дают: косвенный метод - $A_r/A_0 = 0,342$; ультразвуковой метод - $A_r/A_0 = 0,3$. Это может служить доказательством вышеприведённых рассуждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетика М.Ф. Анализ напряжённого состояния в контактном слое стружки при резании. / Кн. "Перспективы развития резания конструкционных материалов." - М.: ЦП НТО МАШПРОМ, 1980, с. 18-22.
2. Полетика М.Ф. Основные типы контактных условий на передней поверхности инструмента и их связь с процессом стружкообразования. / Сб. "Пути интенсификации производственных процессов при механической обработке." - Томск: Изд-во ТПИ, 1979. - с.2-8.
3. Полетика М.Ф., Красильников В.А. Напряжения и температура на передней поверхности резца при высоких скоростях резания. //Вестник машиностроения, 1973, №10, с.76-81.
4. Полетика М.Ф., Утешев М.К. Исследование процесса резания поляризационно-оптическим методом. //Известия Томского политехнического института, т.114, 1964, с.157-166.
5. Полетика М.Ф., Мелихов В.В. К вопросу об исследовании напряжений в режущей части инструмента поляризационно-оптическим методом. /Научные труды Тюменского индустриального института, 3, 1967, с.47-48.
6. Chandrasekaran H., Capour D.B. Photoelastic Analysis of force-chip interface stresses. - Trans. ASME, 1965, 87, Ser.B, №04, p-p.495-502.
7. Kato S., Jamaguchi K., Jamala M., Stress distribution at the interface between tool and chip in machining. - Trans. ASME, 1972, Ser.B, №2, p-p. 197-204.
8. Козлов А.А., Талантов Н.В. Механизм взаимодействия стружки с передней поверхностью. //Известия вузов. Машиностроение, 1976, №3, с. 147-150.
9. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания. / Сб. "Физические процессы при резании металлов.", -Волгоград: Волгоград. политехн. институт, 1984, с.3-37.
10. Nadai A. Theory of Flow and Fracture of Solids. New-York – Toronto – London, v.1, Sek. Ed., 1950.

Томский политехнический университет