

*В.П. МАРШУБА, И.Б. ПЛАХОТНИКОВА, О.В. МАРШУБА,*

## **МОДЕЛИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ АДГЕЗИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Determination of substantive provisions, methods of researches of mechanical and adhesive constituent of force of friction in the process of cutting of different materials. Taking for basis the developed method of researches of constituents of force of friction, and also existent conformities to the law of co-operation of the physical phenomena arising up and flowing in the process of cutting, to create the physical and mathematical model of process of formation of growths on the basis of the explored mechanism of mechanical and adhesive constituent of force of friction

**1. Постановка проблемы.** По данным технической литературы определяющими видами износа режущего инструмента являются адгезионный и абразивный. В частности по данным А.Я. Котлярова и др. [1], И.В. Крагельского и др. [2] установлено, что адгезионное взаимодействие на контактных поверхностях инструмента приводит к цикличности нагрузок (вибрации), дестабилизирует силу резания и коэффициент трения в зоне контакта, способствует возникновению усталостных разрушений и отрыву микро - и макрочастиц инструментального материала. Следовательно, силы адгезии инициируют возникновение таких физических явлений: как образование и рост наростов, износ контактных площадок инструмента и обрабатываемых деталей, пакетирование стружки и др.

Исходя из того, что наросты возникают в результате совместного действия высоких температур и больших контактных напряжений, часто по интенсивности их образования судят об адгезионном взаимодействии инструментального и обрабатываемого материалов. Но это может привести к ошибочным выводам по доле адгезионного взаимодействия в силе резания, так как наросты возникают в результате не только адгезионного, но и механического взаимодействия (при заклинивании небольших объемов приконтактного слоя металла в микронеровностях поверхности инструмента). При этом поверхностные слои обрабатываемого материала, в связи с высокой скоростью деформации, сильно упрочняются, и разрушение стружки при трении будет происходить в нижележащих слоях, а внедрившиеся частицы металла останутся на поверхности А<sub>у</sub> даже при небольшом адгезионном взаимодействии. Это явление наблюдается в виде белого налета на рабочей части сверла даже после непродолжительной эксплуатации, причем увеличение интенсивности наблюдается по направлению к вершине инструмента.

Установить цикличность образования наростов на контактных поверхностях инструмента можно лишь на основе количественной оценки адгезионной и механической составляющей силы трения. Это позволит установить природу сил трения и тангенциальную прочность адгезионной связи, а также

выявить и объяснить закономерности износа режущего инструмента и пакетирования стружки.

Для снижения дестабилизирующего влияния сил адгезии между инструментальным и обрабатываемым материалом на процесс глубокого безводного сверления (ГБС), необходимо решить ряд вопросов:

1) установить закономерности влияния нормальных напряжений и температуры в зоне контакта на тангенциальную прочность адгезионной связи;

2) определить закономерности изменения величины адгезионного взаимодействия в зоне резания и в зоне обработки;

3) определить причины механического взаимодействия в зоне резания и в зоне обработки.

Разделение на части этого вопроса связано с тем, что закономерности изменения тангенциальной прочности адгезионной связи зависят от нормальных напряжений и температуры, т.е. для каждого избранного набора параметров значение  $\tau_a$  будет постоянным, тогда как закономерности изменения величин адгезионного и механического взаимодействия претерпевают, в зависимости от зоны действия, большие изменения, т.е. могут переходить из одного агрегатного состояния в другое.

При решении этих задач определяли изменение закономерностей тангенциальной прочности адгезионной связи от нормальных напряжений и температуры, необходимых сведений о природе образования пакетов стружки в стружечных канавках, и количественной оценки при трении пар алюминий – быстрорежущая сталь, алюминий – нитрид и карбид титана в отечественной и зарубежной литературе нет. Кроме общих сведений о коэффициентах адгезии различных пар материалов, т.е. в них имеются данные о взаимодействии различных материалов применительно к процессу чистого трения.

На основе анализа данных, можно установить причину образования наростов на контактных поверхностях инструмента, влияющих на пакетирование стружки, природу износа сверл и др., но это возможно только лишь на основе количественной оценки влияния адгезионного и механического взаимодействия, что позволит установить природу сил трения и тангенциальную прочность адгезионной связи в исследуемых парах металлов, а также объяснить закономерность износа инструмента и пакетирования стружки.

**2. Анализ последних исследований.** Для определения тангенциальной составляющей молекулярного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материала в настоящее время существуют ряд приборов и установок, а также разработаны различные методы моделирования физических процессов, протекающих в зоне резания.

Измерение адгезионного взаимодействия исследуемых пар материалов, по данным различных авторов [3; 4; 5; 6 и др.], проводилось при различных температурах в вакууме и естественных условиях (на воздухе), при трении или статическом контакте поверхностей под давлением. Так как многие методы основаны на определении тангенциальной составляющей контактных напряжений (тангенциальной силы адгезионной связи) при трении двух ма-

териалов, или нормальной силы отрыва (удельной силы отрыва) молекулярной связи исследуемых пар материалов при заданных температурах и других параметрах. Из этого следует, что степень адгезии определяется силами сцепления частиц материалов, и поэтому рассмотрим некоторые из них.

В.А. Кондратьев [7] при исследовании адгезионного взаимодействия поликристаллов нитрида бора с металлами использовал вакуумную установку, в которой образцы сжимались при заданной температуре 800...1200° С и затем, после охлаждения определялась прочность на разрыв возникающих мостиков схватывания.

На определении разрывного усилия при разрушении адгезионной связи основан также метод использованный Т.Н. Лолодзе [8]. Существенным отличием этого метода было то, что во время опытов производили не сжатие образцов, а внедрение конического индентора из инструментального материала при заданных температурах. При этом обеспечивался сплошной пластический контакт образца и индентора; что уменьшало влияние упругих сил, возникающих при снятии нагрузки, на разрушение адгезионной связи. Определение разрывного усилия производилось при заданной температуре в зоне контакта после снятия нагрузки.

Главным недостатком этих методов является несоответствие теплового режима или напряженного состояния зоны контакта в период испытаний условиям, существующим в зоне резания при сверлении. Т.к. в процессе резания разрушение адгезионной связи происходит за счет тангенциальной силы при действии нормальных напряжений и высокой температуры. Поэтому более важной характеристикой является тангенциальная прочность адгезионной связи (адгезионная составляющая удельной силы трения), а не сопротивление отрыву. Причем определяться она должна при температурах возникающих в зоне резания.

Более близкие к процессу резания условия могут быть обеспечены при моделировании методом, впервые предложенным Н.М. Михиным [9], который позволяет определить адгезионную составляющую силы трения при различных температурах и нормальных напряжениях в зоне резания. Суть этого метода состоит в определении силы, необходимой для вращения шарового индентора, сжатого между двумя плоскими образцами вокруг оси, проходящей через центр индентора и перпендикулярно к поверхностям образцов.

На основе этого метода для определения тангенциальной прочности адгезионной связи и удельной силы трения, была разработана моделирующая установка В.Л. Коротченко [10], на которой образец исследуемого материала сжимался между двумя коническими инденторами, при высоких температурах 250...860° С и удельных давлениях от 0 до 2400 МПа, т.е. производилось моделирование процесса резания более подходящего к сверлению, чем к фрезерованию. В работе Котлярова А.Я. и др. [11] исследование адгезионного взаимодействия твердосплавных резцов (ВК8, ВК8Та, ВК10КС) со стружкой титановых сплавов (ВТ1–0, ОТ4–0, ВТ9) проводили на экспериментальной маятниковой установке в воздушной среде. При этом моделировали процесс

прерывистого резания по прямоугольной схеме (торцовое фрезерование или строгание). Прочность адгезионной связи определяли на срез прибором и регистрировали осциллографом. Часть экспериментов проводили с нагревом образцов и охлаждением СОТС, а также для инструмента применяли ИзТП (нитрид титана и молибдена, карбид титана и никель-фосфатное покрытие) толщиной от 6 до 25 мкм.

**3. Цель статьи.** Определение основных положений, методов исследований механической и адгезионной составляющей силы трения в процессе резания различных материалов. Взяв за основу разработанный метод исследований составляющих силы трения, а также существующие закономерности взаимодействия физических явлений возникающих и протекающих в процессе резания, создать физическую и математическую модель процесса образования наростов на основе исследованного механизма механической и адгезионной составляющей силы трения.

**4. Изложение основного материала.** Следовательно, для моделирования тангенциальной составляющей силы трения, которая присуща процессу обработки при сверлении, необходимо приблизить условия проведения опытов на моделирующей установке разработанной В.Л. Коротченко [10] к реально протекающим физическим явлениям при ГС литейных алюминиях, применив к ним условия, используемые в работе А.Я. Котлярова [11]. Однако необходимо отметить, что условия создаваемые на моделирующей установке разработанной В.Л. Коротченко не соответствуют условиям при обработке глубоких отверстий. По этому, установка была подвергнута модернизации, т.е. в ней изменена конструкция нагревательных элементов и в их электрическую цепь включен реостат для плавного регулирования температуры в зоне контакта. Кроме этого, главное отличие от опытов В.Л. Коротченко в том, что кроме определения величины адгезионного взаимодействия между инструментом и обрабатываемым материалом в экспериментах проводимых автором использовались износостойкие твердые покрытия (ИзТП) карбида и нитрида титана толщиной 6...10 мкм, наносимые на инденторы. ИзТП применялись не только для снижения вредного влияния адгезионного взаимодействия, но и для увеличения стойкости инструмента. При сверлении отверстий стандартными сверлами температура в зоне резания не может превышать 400° С, из-за потери режущих свойств быстрорежущей стали (красностойкость), поэтому автор исследовал интервал температур от 20° до 400° С и удельные давления, в зоне резания, измеренные в разделе 3, и принятые для этого эксперимента в интервале от 0 до 2200 МПа.

Экспериментальная установка включает в себя: устройство для определения прочности адгезионной связи, динамометры, блок питания и реостат для нагревательных элементов, регистрирующую аппаратуру.

Устройство для определения тангенциальной прочности адгезионной связи (рис. 1) состоит из корпуса 1, в двух соосных отверстиях которого установлены подвижный в осевом направлении шток 2 и неподвижный 3 с инденторами 4 из стали Р6М5Ф3, закрепленными в теплоизолирующих втулках

5. Цилиндрические поверхности инденторов охватывают кольцевыми нагревательными элементами 6. Подвод к ним электрического тока осуществляется через реостат и автотрансформатор РНО–250–2А. Между инденторами сжат образец 7, установленный в теплоизолирующей керамической втулке 8, закрепленный с ней в диске 9. Вращение образца осуществляется с помощью гибкого тросика, связывающего диск 9 с динамометром 10, установленным в шпинделе фрезерного станка модели 6Р82.

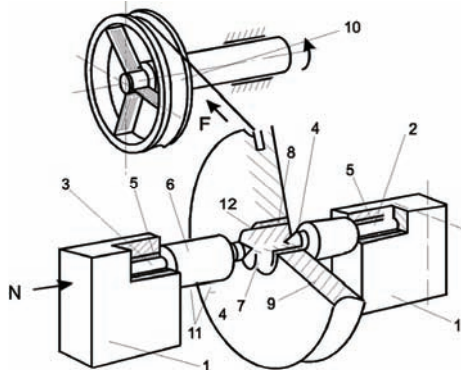


Рис. 1—Устройство для определения тангенциальной прочности адгезионной связи и механической составляющей силы трения при взаимодействии стали Р6М5Ф3, ИзТП и литейных алюминьев: 1) корпус; 2) подвижный в осевом направлении шток; 3) неподвижный шток; 4) инденторы из быстрорежущей стали; 5) термоизолирующие втулки; 6) нагревательные элементы; 7) образец из литейных алюминьев; 8) термоизолирующая керамическая втулка; 9) диск; 10) динамометр; 11) электроконтакты нагревательных элементов; 12) рабочие термопары.

Плоский образец, имеющий центральное отверстие  $\varnothing 5$  мм, сжимали между двумя коническими поверхностями инденторов из стали Р6М5Ф3 или между инденторами из этой стали с ИзТП. Измеряя усилие, необходимое для вращения образца, при различных температурах и давлениях, определяли удельную силу трения, которая при достаточно высокой геометрической точности контактных поверхностей инденторов и низкой шероховатости, равна тангенциальной прочности адгезионной связи. Конические торцовые поверхности индентора шлифовали и притирали, обеспечив шероховатость поверхности  $R_a=0,04...0,063$  мкм.

Контактную зону нагревали инденторов с помощью нихромовых нагревательных элементов, охватывающих их цилиндрическую поверхность. Температуру в зоне контакта контролировали с помощью хромель-алюмелевых термопар, термоэлектронны которых были установлены в радиальных отверстиях образца. Градуирование термопар осуществляли с помощью эталонной термопары, зажатой между контактными поверхностями образца и индентора (рис. 2), при нагреве инденторов нагревательными элементами. В начале проведения опытов температура контактной зоны была  $20^\circ\text{C}$ , затем она повышалась до  $400^\circ\text{C}$ , что соответствует реальному процессу обработки.

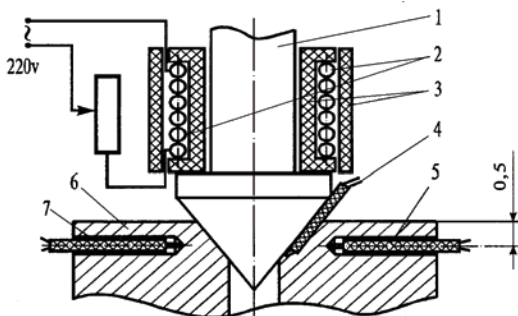


Рис. 2 – Градуирование термопары на установке. 1) индуктор; 2) нагревательный элемент; 3) электротермоизолирующая втулка; 4) контрольная термопара; 5,7) термоэлектроды рабочей термопары; 6) образец из литейных алюминиев.

Динамометр (рис. 3) представляет собой кольцо 1, с закрепленным на нем гибким тросиком 2 и оправку 3, установленную в шпинделе станка. Между кольцом 1 и оправкой 3 радиально расположены три упругих элемента (листовые пружины) 4, на которых наклеены тензорезисторные датчики 5. Электрический сигнал с тензорезисторных датчиков усиливали усилителем ТА-5 и регистрировали осциллографом Н117-1.

Удельную силу трения в зоне контакта индукторов с образцами рассчитывали по измеренной силе, необходимой для вращения образца (рис. 4).

Крутящий момент при вращении образца:

$$M_{кр} = F \times R \quad (1)$$

где  $F$  – измеренная сила вращения;  $R$  – радиус диска, в котором закреплен испытуемый образец,  $R=0,0075$  м.

С другой стороны, момент трения на контактных поверхностях двух индукторов с образцом определяется соотношением:

$$M_{кр} = 8\tau_{F_1} \int_{r_0}^{r_{отп}} \int_0^{\frac{\varphi}{2}} r^2 dr (\sin \frac{\varphi}{2}) d\Theta \quad (2)$$

где  $\tau_{F_1}$  – удельная сила трения на поверхности конуса,  $\tau_{F_1}=\tau_a$ ;  $r_0$  – радиус отверстия в образце,  $r_0=0,025$  м;  $r_{отп}$  – радиус отпечатка, полученного при давлении конуса в образец из литейных алюминиев;  $r_{отп}=0,003$  м;  $\varphi$  – угол конуса,  $\varphi=60^\circ$ .

Интегрируя выражение (2), получим:

$$M_{кр} = \frac{4}{3} \pi \tau_a \sin \frac{\varphi}{2} (r_{отп}^3 - r_0^3) \quad (3)$$

Из выражений (1) и (3), следует:

$$\tau_a = \frac{3}{4} \times \frac{FR}{\pi(r_{отп}^3 - r_0^3) \times \sin \frac{\varphi}{2}} \quad (4)$$

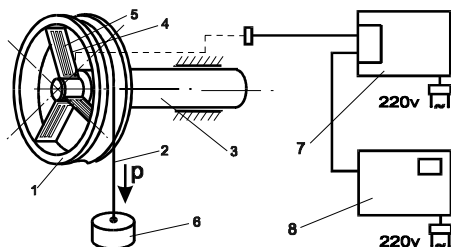


Рис. 3 – Схема тарирования динамометра. 1) диск; 2) гибкий тросик; 3) оправка; 4) три радиально расположенных упругих элемента (листовые пружины); 5) тензодатчики; 6) груз; 7) усилитель ТА-5; 8) осциллограф Н117-1.

Контактные давления при сжатии образцов с силой  $N$  рассчитывали по формуле:

$$\rho = N / \pi (r_{отп}^2 - r_0^2) \quad (5)$$

При определении адгезионной составляющей силы трения данным методом неизбежны погрешности, вызванные влиянием механической (деформационной) составляющей. Под воздействием высокой контактной температуры и удельного давления плитейные алюминитически деформированный металл заполняет микронеровности поверхности индентора, при последующем вращении образца происходит механический срез или плитейные алюминитическое отеснение поверхностных слоев, то есть, наряду с разрушением адгезионной связи возникает механическая составляющая силы трения.

Для оценки вклада механической (деформационной) составляющей в суммарную силу трения, измеренную на моделирующей установке, использовали формулу предложенную Н.М. Михиным [9] для расчета деформационной составляющей коэффициента трения в условиях плитейные алюминитического контакта:

$$\mu_{ДЕФ} = 0,55 K_{vf}^n (h/\rho)^{0,5} \quad (6)$$

Параметры микрогеометрии контактной поверхности индентора определяли на профилографе:  $Ra=0,048$  мкм;  $Rmax=0,2$  мкм;  $v = 1,6$ ;  $\rho=660$  мкм.

Зависимость коэффициента  $K_{vf}^n$  от  $v$  приведена в работе И.В. Крагельского [2]. При  $v = 1,6$ ;  $K_{vf}^n = 0,82$  тогда, полагая, что глубина внедрения микронеровностей индентора в материал заготовки будет равна высоте микронеровностей,  $h=Rmax$ , получим,  $\mu_{деф} = 0,01$ . Следовательно, при изменении коэффициента трения, определенного на моделирующей установке, в пределах 0,05...0,1 погрешность вызванная влиянием деформационной составляющей не будет превышать 10...20%. При выполнении опытов на моделирующей установке использовали инденторы из стали Р6М5Ф3 и образцы из литейных алюминия. На инденторы наносили одно- или многослойные ИзТП оксида- нитрида титана по ГОСТу 9.073-77.

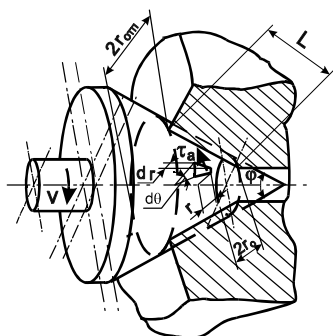


Рис. 4—Расчетная схема для определения момента трения конического индентора:  $r_{отп}$  – радиус отпечатка, полученного при вдавливании конуса в образец;  $2r_0$  – радиус отверстия в образце;  $\tau_a$  – сила, необходимая для вращения образца;  $\phi$  – угол конуса индентора;  $v$  – скорость вращения конуса;  $d\Theta$  – угловой размер расчетной контактной площадки;  $r$  – радиус расчетной контактной площадки.

Индентор и образец перед проведением опытов обезжиривали в кипящем толуоле и протирали активированным углем. Температурно-силовые условия при выполнении опытов на моделирующей установке выбирали близкими к реально существующим при резании металлов: т.е. нормальные контактные напряжения при проведении опытов изменяли в пределах от 0 до 2200 МПа, температуру в зоне контакта от 20 до 400°С. Для определения целесообразности применения моделирующей установки и методов расчета адгезионной составляющей силы резания, были проведены многочисленные исследования тангенциальной прочности адгезионной связи  $\tau_a$  и механической составляющей силы трения  $\mu_{деф}$ . Каждую серию опытов дублировали 3...5 раз, средняя погрешность воспроизводимости не превышала 15%.

В ходе проведения экспериментов было установлено, следующее: 1. На специально разработанной моделирующей установке по определению тангенциальной прочности адгезионной связи  $\tau_a$  и механической составляющей силы трения  $\mu_{деф}$ , были проверены закономерности изменения  $\tau_a$  и  $\mu_{деф}$  для исследуемых пар материалов, которые показали, что в зависимости от контактного давления и температуры, исследуемые закономерности адгезионного и механического взаимодействия литейных алюминия с поверхностями А $\gamma$  и А $\alpha$  сверл из стали Р6М5Ф3, с нанесенными на них ИзТП подчиняются бинминальному закону молекулярного трения. Следовательно, на поверхности А $\alpha$  тангенциальная прочность адгезионной связи хорошо описывается уравнением:  $\tau_\alpha = \tau_o + \beta r$ ; тогда как, на поверхности А $\gamma$ :  $\tau_\gamma = \tau'_o + \beta r$ .

2. Сдвиговое сопротивление адгезионной связи экстремально изменяется в зависимости от температуры в связи с противоположным влиянием двух факторов: а) термической активацией адгезионного взаимодействия; б) тепловым разупрочнением мостиков схватывания. Коэффициент упрочнения адгезионной связи  $\beta$  с повышением температуры изменяется при фрикцион-



ном контакте исследуемых пар материалов в пределах от 1,6 до 3,8 на поверхности  $A\gamma$  и  $A\alpha$ .

3. Основное влияние на тангенциальную прочность адгезионного взаимодействия по контактных площадках на поверхностях  $A\gamma$  и  $A\alpha$  сверла при ГБС в литейных алюминиях оказывают нормальные напряжения  $\rho$ , в соответствии с изменением которых прочность адгезионной связи между обрабатываемым и инструментальным материалом изменяется в значительных пределах от 2 до 7 раз. Тепловое разупрочнение адгезионной связи (мостиков схватывания) и упрочнение поверхностного слоя заготовки под действием нормальных напряжений оказывает одинаковое влияние на прочность адгезионного взаимодействия, в связи, с чем тангенциальная прочность адгезионной связи для наших условий изменяется в незначительных пределах до 15%.

4. При фрикционном контактировании сверл с тонкими износостойкими покрытиями нитрида и карбида титана и литейных алюминия по поверхности  $A\gamma$  инструмента преобладает механическое взаимодействие, тогда как по поверхности  $A\alpha$  – адгезионное. Опыты дублировали 3...5 раз, средняя погрешность воспроизводимости не превышала 15%.

**5. Выводы.** Проведенные исследования показали, что применение данной исследовательской установки и разработанной методики определения, составляющих силы трения, целесообразно при исследовании тангенциальной прочности адгезионной связи  $\tau_a$  и механической составляющей силы трения  $\mu_{\text{деф}}$  в условиях процесса обработки, так как условия проведения опытов наиболее точно отвечают условиям протекания процесса резания.

Список литературы: 1. А.Я. Котляров и др. Прочность адгезионной связи реза со стружкой при прерывистом резании сплавов титана. // Станки и инструмент. - 1979. - №9. - С. 19-21. 2. И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с. 3. А.с. 348927 СССР, МКИ В23 В51/00. Прибор для определения молекулярной составляющей коэффициента трения. / В.В. Алисин, К.С. Лянин, М.Н. Михин (СССР). №1648577/25-28; Заявлено 19.04.71; Оpubл. 30.08.72, Бюл. №25. - 3 с. 4. Васильев С.В. Оперативное определение адгезионной активности при обработке резанием. // Станки и инструмент. -1985.-№5.-С.28-29. 5. Г. В. Виноградов. Трение и износ в машинах. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. -№15. -С. 180-185. 6. В.П. Маршуба. Адгезионное взаимодействие быстрорежущей стали с литейными алюминиевыми сплавами. // Труды VII Междунар. семинара. 24-28 сентября "Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг." - Харьков: ХГПУ, - 1997. - С. 185-187. 7. В.А. Кондратьев. Исследования износа инструмента на основе поликристаллического нитрида бора. //Алмазы и сверхтвердые материалы. - М., ИХИН, 1978. -№9, - С. 13-16. 8. Т.Н. Лолодзе. Прочность и износостойкость режущих инструментов. - М.: Машиностроение, 1982. - 320 с. 9. Н.М. Михин. Трение в условиях пластического контакта. - М.: Наука, 1968. - 104 с. 10. В.Л. Коротченко. Физические закономерности и повышение эффективности процесса резания железоуглеродистых сплавов торцовыми фрезами из гексанида-Р: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1987. - 237 с. 11. А.Я. Котляров и др. Прочность адгезионной связи реза со стружкой при прерывистом резании сплавов титана. // Станки и инструмент. - 1979. - №9. - С. 19-21.

*Поступила в редколлегию 18.02.08*