

Коломиєц В.В.<sup>1</sup>,  
Фабричникова І.А.<sup>1</sup>,  
Любичева К.М.<sup>1</sup>,  
Vijay Kumar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный  
технический университет  
сельского хозяйства  
имени П. Василенка,  
г. Харьков, Украина  
<sup>2</sup>ИИТ CREATER NOIDA,  
India

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ  
ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С РЕЗЦАМИ  
ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА И СВЕРХТВЕРДЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

УДК 621. 923

*В работе приведены результаты определения коэффициентов трения сталей и наплавленных материалов с твердым сплавом и сверхтвердыми материалами.*

*Ключевые слова: коэффициенты трения, стали, наплавленные материалы, скорости резания, резы, твердый сплав, гексанит-Р.*

**Введение.** При резании сплошных и наплавленных материалов трение стружки о переднюю поверхность инструмента и обрабатываемой поверхности о его задние поверхности оказывает большое влияние на характер протекания всего процесса резания. Работа деформации и работа трения являются основными источниками теплообразования при всех видах процесса резания. Величина характеристик трения зависит от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, состояния контактных поверхностей и режимов процесса обработки [1]. Физические характеристики взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов зависят от внешнего и внутреннего трения, которые сопровождаются явлениями адгезии и диффузии и приводят к появлению нормальных и касательных напряжений на передней и задних поверхностях инструмента, упругих и пластических деформаций слоев обрабатываемого материала [2, 3]. Изменяя трение можно управлять характером протекания процесса резания, а, следовательно, качеством обработанной поверхности и стойкостью режущего инструмента. Решению этой задачи препятствует недостаточная изученность особенностей трения сверхтвердых инструментальных материалов, в частности таких, как АСБ, АСПК, эльбор-Р и гексанит-Р, с закаленными, конструкционными, и быстрорежущими сталями и наплавленными материалами [4 - 7].

**Объектом исследования** является определение коэффициентов трения между инструментальными и инструментальными материалами и определение влияния технологических параметров процесса резания на величину коэффициентов трения.

**Цель исследования.** Выявить причины и характер взаимодействия между инструментом и обрабатываемым материалом в зоне контактного трения и установить зависимость характеристик трения от обрабатываемого и инструментального материала.

**Методы исследования.** При экспериментах процесс резания моделировался на специальной установке (рис. 1) с использованием пары трения индентор из инструментального материала – цилиндрический образец из обрабатываемого материала

Индентор с рабочей поверхностью 0,2 x 4 мм изготавливался из твердого сплава Т15К6 и из сверхтвердых материалов на основе алмаза типа АСБ и АСПК и на основе нитрида бора типа эльбор-Р и гексанит-Р. Материал цилиндрического образца – закаленные стали 45 (HRC 48-50), У10 (HRC 58-60) и Р6М5 (HRC 62-64), а также материалы, наплавленные проволоками Нп-Св08, Нп-У8А, Нп-12Х18Н9Т, Нп-30ХГСА, ПП-Нп-25Х5ФМС, ПП-Нп-10Х14Т, ПП-Нп-30Х5Г2СМ и ПП-Нп-250Х10Б8С2Т.

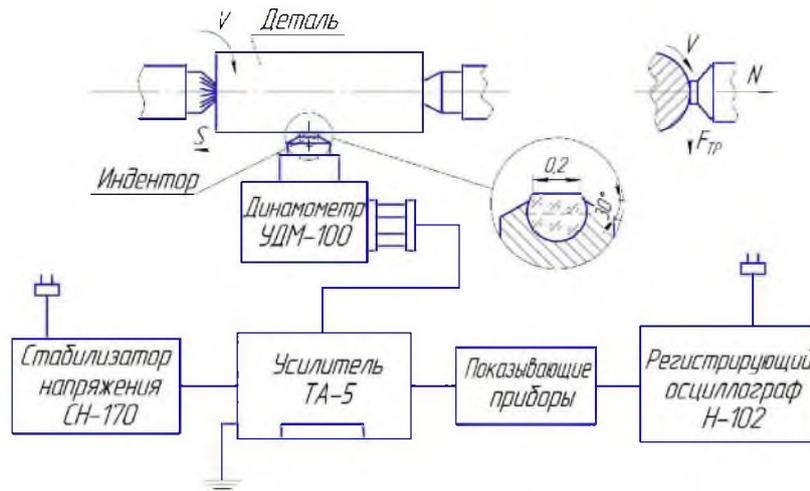


Рис. 1 – Схема установки для определения коэффициентов трения

Индентор устанавливался в динамометре УДМ-100 и перемещался при заданной нагрузке с подачей 0,3 мм/об вдоль образующей цилиндрического образца, что исключало возможность повторного контакта трущихся поверхностей. В процессе опытов наблюдалось истирание индентора, характер которого подтвердил близость условий проведения экспериментов и реальных условий резания.

Коэффициент трения рассчитывался из соотношения  $\mu = F_{TP}/N$ , где  $F_{TP}$  – сила трения (составляющая  $P_z$ );  $N$  – сила нормального давления (составляющая  $P_y$ ). По величине силы  $N$  определялось контактное давление  $q = N/f$ , где  $f$  – площадь контакта трущейся пары, которая измерялась на специальном микроскопе (увеличение 100). В качестве смазки применялось индустриальное масло 20, которое подавалось в зону трения поливом.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Влияние среднего контактного давления на коэффициент трения эльбора-Р с закаленными сталями изучалось при скоростях трения-скольжения, соответствующих максимуму зависимости  $\mu = f(v)$ . Как видно из рис. 2, изменение коэффициента трения с повышением контактного давления носит экстремальный характер.

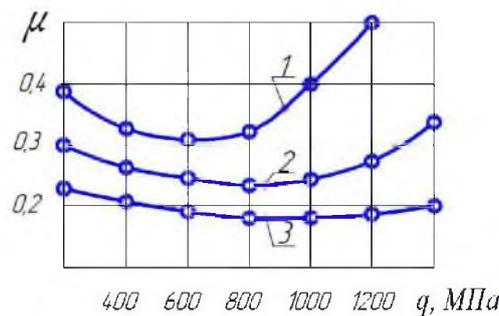


Рис. 2 – Влияние контактного давления на коэффициент трения  
 1 – сталь 45 ( $v = 2,0$  м/с); 2 – У10А ( $v = 1,5$  м/с); 3 – Р6М5 ( $v = 1,3$  м/с)

В наибольшей степени рост контактного давления влияет на коэффициент трения эльбора-Р со сталью 45. Опыты показывают, что с повышением твердости закаленной стали минимум коэффициента трения, смещается в сторону больших контактных давлений. Оптимальным контактным давлением, соответствующим минимуму коэффициента трения, для стали 45 является 600 МПа, для стали У10 – 800 МПа, для стали Р6М5 – 1000 МПа. Левые ветви кривых на рис. 2 обуславливаются главным образом упругим контактом при наличии окисных граничных смазочных пленок, правые – преимущественно пластическим контактом, увеличение которого приводит к увеличению силы и коэффициента трения.

Зависимость коэффициента трения от скорости трения-скольжения индентора из эльбора-Р при его контакте с различными закаленными сталями также носит экстремальный характер (рис. 3).

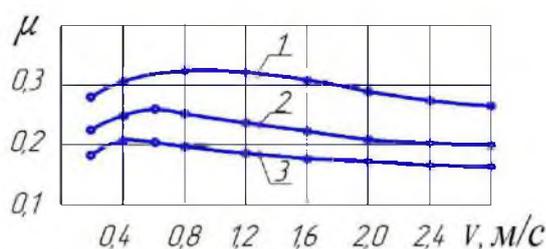


Рис. 3 – Влияние скорости трения-скольжения на коэффициент трения  
 1 – сталь 45 (q = 600МПа); 2 – У10А (q = 800МПа); 3 – Р6М5 (q = 1000МПа)

Такая зависимость связана с изменением свойств окисных смазочных пленок и развитием наростов на трущихся поверхностях индентора и образца.

Изучение влияния смазки на коэффициент трения АСБ, АСПК и эльбора-Р с закаленными сталями, в частности, со сталью Р6М5 (табл. 1), показало, что смазка практически не влияет на характер зависимости  $\mu = f(v)$ .

Однако смазка по-разному влияет на величину коэффициента трения различных сверхтвердых материалов.

Таблица 1

Кoeffициенты трения АСБ, АСПК и эльбора-Р со сталью Р6М5

Скорость трения, м/с	Без смазки			Со смазкой		
	АСБ	АСПК	Эльбор-Р	АСБ	АСПК	Эльбор-Р
0,5	0,21	0,25	0,2	0,14	0,12	0,16
0,75	0,26	0,3	0,22	0,12	0,11	0,14
1,0	0,24	0,28	0,18	0,11	0,09	0,13
1,25	0,22	0,26	0,18	0,10	0,09	0,12
1,5	0,21	0,25	0,18	0,10	0,08	0,12
1,75	0,21	0,25	0,17	0,10	0,08	0,12
2,0	0,21	0,25	0,17	0,10	0,08	0,12
2,5	0,2	0,24	0,17	0,10	0,08	0,12

Характер влияния контактного давления на величину коэффициента трения сверхтвердых материалов с быстрорежущей сталью со смазкой и без смазки приведен в табл. 2.

Таблица 2

Кoeffициенты трения АСБ, АСПК и эльбора-Р со сталью Р6М5

Контактное давление, МПа	Без смазки			Со смазкой		
	АСБ	АСПК	Эльбор-Р	АСБ	АСПК	Эльбор-Р
400	0,22	0,26	0,2	0,12	0,09	0,13
600	0,21	0,25	0,19	0,11	0,08	0,12
800	0,2	0,25	0,18	0,10	0,08	0,12
1000	0,2	0,25	0,18	0,10	0,08	0,12
1200	0,22	0,26	0,19	0,11	0,09	0,13
1400	0,24	0,28	0,20	0,13	0,10	0,15
1600	0,27	0,32	0,23	0,16	0,13	0,18

Минимальное значение коэффициентов трения наблюдается при значительных контактных давлениях 800-1000 МПа, что можно объяснить высокими прочностными свойствами трущихся пар. Изменение контактного давления в большей степени влияет на величину коэффициента трения без смазки. Использование смазки снижает экстремальность исследуемых зависимостей, что особенно важно в процессе тонкого точения, когда в период приработки инструмента наблюдаются большие контактные давления.

Обработка неоднородных наплавленных материалов, имеющих много разнообразных дефектов в срезаемом слое, сопровождается чрезвычайно интенсивным трением, имеющим свои специфические особенности и отличия от трения при резании однородных сплошных материалов.

На рис. 4. показано влияние скорости трения-скольжения на коэффициент трения твердого сплава Т15К6 и сверхтвердого материала гексанита-Р с неоднородными наплавленными материалами. Данные получены при контактных давлениях для Т15К6: 1 – 500; 2 – 600; 3 – 700; 4 – 800; 5 – 900; 6 – 1000 Мпа, и для гексанита-Р: 3 – 1600; 4 – 1800; 5 – 2000; 6 – 2100МПа.

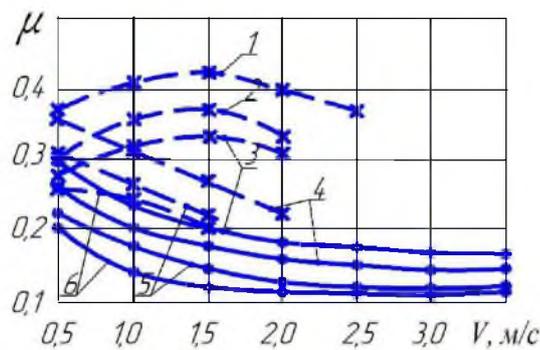


Рис. 4 – Влияние скорости трения-скольжения на коэффициент трения  
(x—x) Т15К6; (o—o) гексанит-Р;

1 – Нп-Св08; 2 – Нп-У8А; 3 – Нп-30ХГСА; 4 – ПП-Нп-25Х5ФМС; 5 – ПП-Нп-10Х14Т; 6 – ПП-Нп-30Х5Г2СМ

Как видно из расположения графиков характер всех зависимостей одинаков, а коэффициент трения уменьшается с увеличением твердости неоднородного материала, что можно объяснить уменьшением его пластичности.

Коэффициент трения в значительной степени зависит от удельного давления, с увеличением которого увеличивается температура в зоне контакта, что изменяет характер взаимодействия контактирующих пар. Так, с увеличением удельного давления коэффициент трения первоначально уменьшается при трении самых различных пар инструментальных и неоднородных наплавленных материалов, что связано с уменьшением температуры контакта (рис. 5). Данные получены при скоростях трения для Т15К6: 1 – 1,5 м/с; 2 – 1,3 м/с; 3 – 1,2 м/с; 4 – 1,0 м/с; 5 – 0,8 м/с; 6 – 0,6 м/с, и для гексанита-Р: 3 – 2,3 м/с; 4 – 2,0 м/с; 5 – 1,8 м/с; 6 – 1,5 м/с.

Положение минимума в этой зависимости соответствует полному заполнению впадин микронеровностей, пор, трещин и других дефектов наплавки на поверхности образца. Дальнейший рост удельных давлений не оказывает существенного влияния на площадь действительного контакта, однако при этом увеличиваются молекулярные составляющие силы резания, что увеличивает коэффициент трения.

Отличительные особенности влияния неоднородности наплавленного материала на коэффициент трения при моделировании наблюдается для разных по природе материалов, типа наплавленного материала нержавеющей стали и мало пластичного чугуна. Так, при трении индентора из твердого сплава Т15К6 по поверхности, наплавленной про-

волокой Нп-12Х18Н9Т, имеет место явно выраженный максимум в зависимости коэффициента трения от скорости трения-скольжения. Это можно объяснить лучшим заполнением микропор, трещин, раковин, как материала образца, так и материала инструмента разогретым никелем, что приводит к увеличению коэффициента трения.

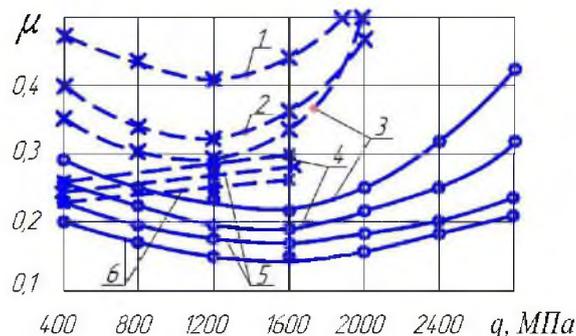


Рис. 5 – Влияние удельного давления на коэффициент трения  
 (х—х) Т15К6; (о—о) гексанит-Р;

1 – Нп-Св08; 2 – Нп-У8А; 3 – Нп-30ХГСА; 4 – ПП-Нп-25Х5ФМС; 5 – ПП-Нп-10Х14Т; 6 – ПП-Нп-30Х5Г2СМ

При трении инденторов из твердого сплава Т15К6 и из гексанита-Р по материалу с большой неоднородностью и малой пластичностью типа наплавленный высокопрочный чугун ПП-Нп-250Х10Б8С2Т достигаются высокие значения коэффициентов трения, что обусловлено наличием только упругих контактов в зоне трения и большим количеством дефектов в наплавке. Величины коэффициентов трения инденторов по этому наплавленному материалу почти в 2 раза больше, чем по наплавленным материалам типа легированных и инструментальных сталей. Для сравнения величины коэффициентов трения, полученные при моделировании трения инденторами из твердого сплава Т15К6 и из гексанита-Р по различным наплавленным материалам, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Величины коэффициентов трения при моделировании

Марка материала	Твердость, НРС	Скорость трения, м/с	Удельное давление, МПа	Коэффициент трения	
				Т15К6	Гексанит-Р
Нп-Св08	НВ 180-200	1,5	500	0,43	–
Нп-У8А	НВ 210-220	1,3	600	0,37	–
Нп-30ХГСА	33-38	1,2; 2,3	700; 1600	0,35	0,18
Нп-12Х18Н9Т	35-40	1,0; 2,0	800; 1600	0,42	0,27
ПП-Нп-25Х5ФМС	35-40	1,0; 2,0	800; 1600	0,31	0,17
ПП-Нп-10Х14Т	50-55	0,8; 1,8	900; 2000	0,28	0,15
ПП-Нп-30Х5Г2СМ	55-60	0,6; 1,5	1000; 2100	0,27	0,13
ПП-Нп-250Х10Б8С2Т	55-62	– ; 1,3	– ; 1800	–	0,43

Примечание: сначала указаны величины скорости трения и удельного давления для инденторов из твердого сплава Т15К6, а затем для гексанита-Р.

Из приведенных данных в табл. 3 видны отличия в величинах коэффициентов трения различных по свойствам и неоднородности наплавленных и инструментальных материалов, что необходимо учитывать при назначении технологических параметров процесса резания.

**Выводы.** Коэффициенты трения твердого сплава, как со сталью, так и с наплавленными материалами на 40 – 60% больше чем у сверхтвердых материалов и на основе алмаза и на основе нитрида бора. Применение смазки при трении инструментов из сверхтвердых материалов при трении и по стали, и по наплавленным материалам приводит к незначительному уменьшению коэффициентов трения. Это необходимо учитывать при назначении режимов резания в технологических процессах восстановления деталей машин.

#### Литература:

1. *Кравченко Б.А.* Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов /Б.А. Кравченко. Куйбышев: Куйбышевское кн. изд-во, 1962 – 179 с.
2. *Костецкий Б.И.* Трение, смазка и износ в машинах / *Б.И. Костецкий.* – К.: Техника, 1970. – 396 с.
3. *Костецкий Б.И.* Механические процессы при граничном трении /*Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бердашский.* – М.: Наука, 1972. – 170 с.
4. *Коломиец В.В., Тимофеев П.В.* Изучение трения поликристаллических сверхтвердых материалов с закаленными сталями. /Сб. Синтетические алмазы. Киев. 1977. №3. С. 27-31.
5. *Коломиец В.В., Сорбат В.И., Малышев В.Н., Голик В.В., Мозок В.М., Демура Ф.Л.* Коэффициенты трения гексанита-Р с наплавленными поверхностями. /Сб. Алмазы и сверхтвердые материалы. М. 1979. №10. С. 9...10.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. /Под общей ред. *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова.* В десяти томах. – Т.3. «Резание материалов лезвийными инструментами». Одесса: ОНПУ. 2003. – 550 с. /Монография. Авторы: *Новиков Ф.В., Якимов А.В., Коломиец В.В.,* и др./.
7. *Тищенко Л.Н., Коломиец В., Любичева К.М., Vijay Kumar.* Определение коэффициентов трения при резании неоднородных наплавленных материалов резцами из ПСТМ. / Труды 21-й международной научно-практической конференции «Физические и компьютерные технологии». Харьков. 2015. – С. 64...68.

#### Summary

**Kolomiets V.V., Fabrichnikova I.A., Liubicheva K.M., Vijay Kumar** Determination of the friction coefficients of the processed materials with cutters made of hard alloy and superhard materials

*The paper presents result of the determining the friction coefficients of steels and welded materials with a hard alloy and superhard materials.*

**Keywords:** *friction coefficients, steels, welded materials, cutting speeds, chisels, hard alloy, hexanite-R.*

#### References

1. *Kravchenko B.A.* The force, residual stress and friction at cutting metal. /B.A. Kravchenko. Kuibyshev. Book, 1962. – 179 p.
2. *Kostetskiy B.I.* The friction, lubricant and wear in machines. /B.I. Kostetskiy. K.: Technikal. 1970. – 396 p.
3. *Kostetskiy B.I.* The mechanical processes with boundary friction. /B.I. Kostetskiy, M.E. Natanson, L.I. Berdachskiy. M.: Book. 1972. - 170 p.
4. *Kolomiets V.V.* Studying of friction of polycrystalline superhard materials with harden steels. /Co. Synthetic diamond. K.: 1977. N3. - p. 27-31.

5. Kolomiets V.V. The friction coefficients of hexanit-R with welded surface. /V.V. Kolomiets, V.I. Sorbat, V.N. Malyshev [i dr.] //Co. Diamond and superhard materials. M. 1979. N10. – p. 9-10.
6. Physico-mathematical theory of the processing of materials and technology of engineering. / Under the general ed. F.V. Novikov and A.V. Yakimova. In ten volumes. - T.3. "Cutting of materials with blade tools". Odessa: ONPU. 2003. - 550 with. /Monograph. Authors: Novikov F.V., Yakimov A.V., Kolomiets V.V., and others.
7. Tishchenko L.N. The determination of friction coefficients cutting of welded materials with chisels by PSTM. /L.N. Tishchenko, V.V. Kolomiets, K.M. Lubicheva, Vijay Kumar. //Trudy – XXI Mezhdurodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Fizicheskie and compyuternye tekhnologii”. Kharkiv, 2015. - p. 64-68.