

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ТИТАНОВЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СПЛАВОВ. СУХОЕ И ГРАНИЧНОЕ ТРЕНИЕ

© 2020 Д.В. Евдокимов, М.А. Олейник

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 20.12.2019

Представлены результаты обработки проведенного натурального эксперимента по определению коэффициента трения между титановыми сплавами и твердым сплавом. В процессе эксперимента варьировалась скорость тел-участников пары трения, а также сила их прижатия друг к другу. Трение проходило как в условиях подачи СОЖ, так и без нее. Результатом обработки данных стали эмпирические зависимости, позволяющие в зависимости от условий трения получать величину коэффициента трения.

*Ключевые слова:* механическая обработка, коэффициент трения, титановый сплав, твердый сплав, трибология, эмпирические зависимости, СОЖ.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в современном производстве наблюдается устойчивая тенденция, направленная на усложнение промышленных изделий и использование материалов, вызывающих определенные сложности при механической обработке. Также возрастают скорости обработки деталей, из-за которых наблюдается повышенный износ инструмента, высокие температуры в зоне резания.

Высокие температуры в зоне резания могут привести к структурнофазовому превращению материала заготовки, что повлияет на прочностные характеристики изделия. Силы резания, в совокупности с температурой являются управляющим фактором, от которого зависят не только остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое изделия. В свою очередь качество поверхностного слоя изделия зависят не только от остаточных напряжений, но и от геометрических параметров, которые склонны к ухудшению в результате износа режущего инструмента [1].

В авиационной и космической отраслях широко используются титановые сплавы, которые, как известно, являются труднообрабатываемыми [1]. А это значит, что процесс механической обработки титановых сплавов требует углубленного исследования.

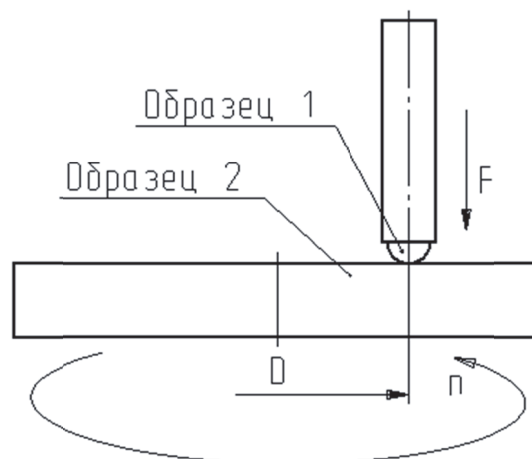
Тепло, которое образуется в зоне резания, частично вызвано трением инструмента о заготовку и о стружку [1, 2]. Коэффициент трения пары инструмент-заготовка и входит в перечень важных данных, необходимых для вычисления

температурных полей, сил в зоне резания, остаточных напряжений или износа режущего инструмента по разработанным методикам (например, методики [3, 4, 5, 6]).

В статье предложены результаты обработки проведенного натурального эксперимента по определению коэффициента трения между титановыми сплавами и твердым сплавом в условиях подачи СОЖ и без нее.

### ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент был проведен на автоматическом трибометрическом комплексе *CSM Instruments TRB*. Установка позволяет варьировать относительной скоростью движения тел пары трения, а также усилием их прижатия друг к другу. Трибометр проводит испытания по стандарту *ASTM G99 "Standard Test Method for wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus"*. Схема измерений приведена на рис. 1, где образец



**Рис. 1.** Схема проведения измерений

*Евдокимов Дмитрий Викторович, аспирант.*

*Олейник Максим Андреевич, магистр.*

*E-mail: oleynik1997@mail.ru*

1 – шар, выполненный из материала ВК8, прижатый с усилием  $F$  (Н) к образцу 2, изготовленному в виде диска, выполненного из титанового сплава ВТ6/ВТ9/ОТ4 вращающемуся с частотой  $n$  (мин<sup>-1</sup>). В случае граничного трения, в систему подается СОЖ *Blasocut 4000 CF* (концентрация 10 %, которая часто используется в случаях фрезерования титановых сплавов). Скорость  $V$  (м/мин) рассчитывалась следующим образом:

$$V = \pi \cdot D \cdot n,$$

где  $D$  – диаметр трения.

Диаметр твердосплавного шара составлял 12 мм, а образцов, выполненных из титанового сплава – 30 мм, что было обусловлено местом крепления дисков в испытательной установке. Значения фактической шероховатости продемонстрированы в таблице 1.

**Таблица 1.** Шероховатость образцов

Материал образца	Образец	Шероховатость	
		Ra, мкм	Rz, мкм
ВТ6	1	1,15	8,73
	2	1,02	7,92
	3	1,11	8,38
ВТ9	1	0,82	6,22
	2	0,85	7,81
	3	0,81	6,18
ОТ4	1	1,00	7,45
	2	1,08	9,10
	3	1,03	7,07

Так, как экспериментальная установка позволяет варьировать две величины в ходе эксперимента, была использована матрица планирования полнофакторного эксперимента с двумя переменными и отражена в таблице 2.

**Таблица 2.** Матрица планирования двухфакторного эксперимента

№ опыта	Факторы		
	$x_0$	$x_1$	$x_2$
1	+	+	+
2	+	-	+
3	+	+	-
4	+	-	-
5	+	0	0

Ниже представлены таблицы (табл. 3, 4), где указаны величины силы прижатия  $P$  и скорости относительного движения  $U$ , которые были применены в опытах.

Также стоит отметить, что эти величины были выбраны исходя из рабочих диапазонов управляющих параметров экспериментальной установки.

**Таблица 3.** План эксперимента с числовыми значениями варьируемых параметров

Условия планирования		
	$v$ , м/мин	$P$ , Н
Основной уровень	32	14
Интервал варьирования	20	12
Верхний уровень	52	26
Нижний уровень	12	2

**Таблица 4.** Матрица плана с числовыми значениями варьируемых параметров

Матрица плана эксперимента		
№ опыта	$v$ , м/мин	$P$ , Н
1	52	26
2	12	26
3	52	2
4	12	2
5	32	14

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ВЫВОДЫ

В ходе проведения эксперимента было отмечено, что за счет высокой адгезии СОЖ с образцами происходило налипание микростружки на беговых дорожках образца, что способствовало росту коэффициента трения. Образцы после испытаний представлены на рисунке 2.

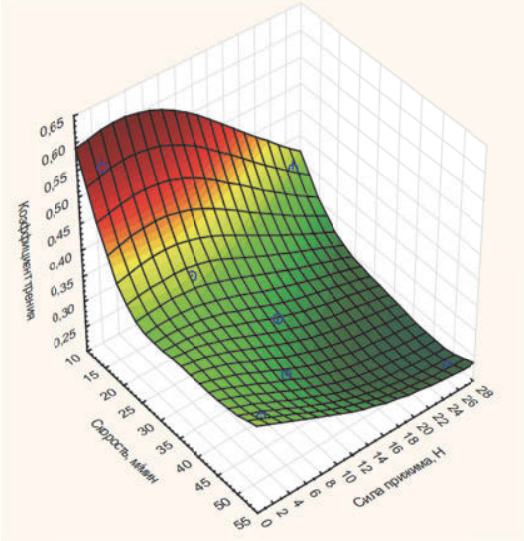
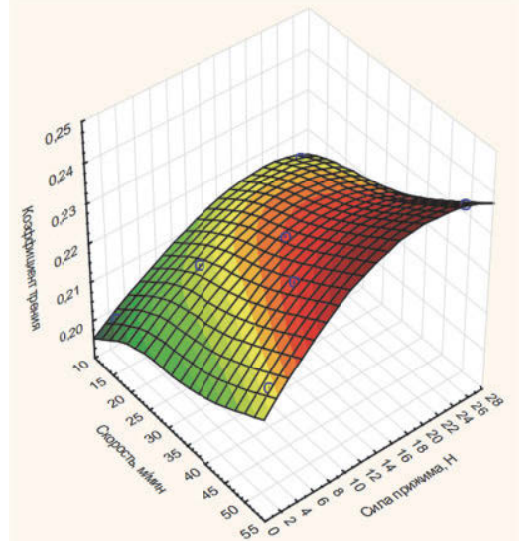
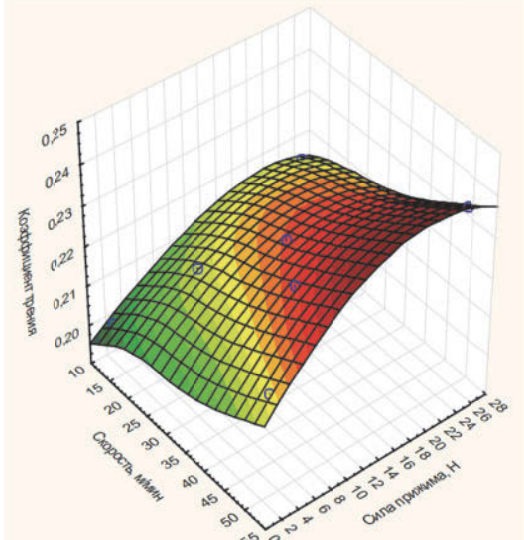
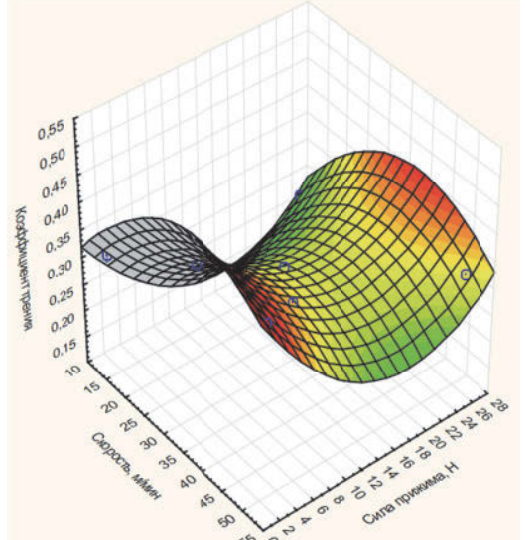
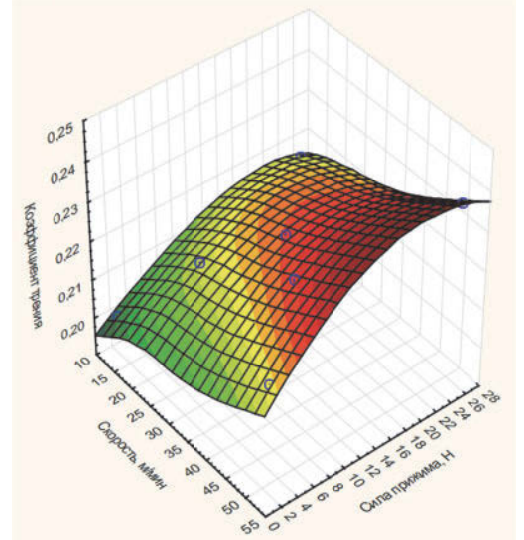
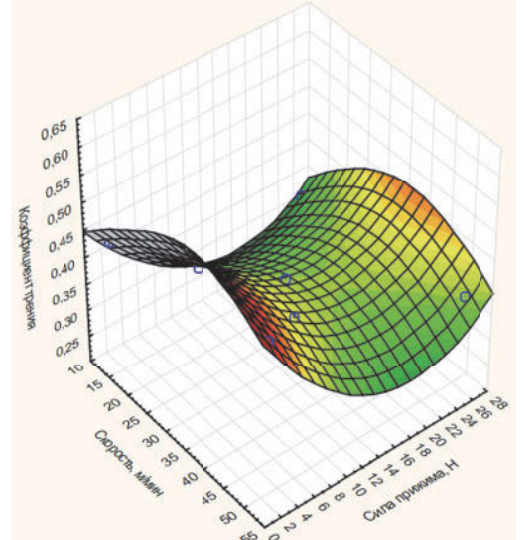


**Рис. 2.** Образец после испытаний и с использованием СОЖ. Общий вид (слева) и вид сверху (справа)

Полученные результаты опытов были обработаны. Данные были подвержены проверке точности проведения опытов, проверке нуль-гипотезы, проверке адекватности модели и т.д. В итоге были получены эмпирические зависимости, позволяющие получать величины коэффициента трения в зависимости от скорости движения, усилия прижатия и наличия СОЖ в зоне трения. Ознакомиться с ними возможно в таблице 5.

Полученные зависимости получены четко по результатам эксперимента. Их рекомендуется использовать при расчетах по компьютерным математическим моделям величин остаточных напряжений, получаемых в поверхностном слое изделия при механической обработке, температурных полей и сил, возникающих в зоне резания.

Таблица 5. Эмпирические зависимости

Материал	При подаче СОЖ	Без подачи СОЖ
ВТ9	$\mu = 1,357v^{-0,315}P^{-0,166}$ 	$\mu = 0,007v^{0,734}P^{0,174}$ 
ВТ6	$\mu = 0,167v^{0,063}P^{0,031}$ 	$\mu = 0,170v^{0,265}P^{-0,124}$ 
ОТ4	$\mu = 1,027v^{-0,197}P^{-0,256}$ 	$\mu = 0,335v^{0,126}P^{-0,112}$ 

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Д., Мухин В.С., Шустер Л.Ш. Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных сплавов: учеб. Пособие. – Уфа: Изд-во Уфимского авиационного института им. Орджоникидзе. 1974. – 272 с.
2. Зорев Н.Н., Клауч Д.М., Батыров В.А. и др. О природе износа твердосплавного инструмента // Вестник машиностроения. 1971. №11. С. 70-73
3. Evdokimov D.V., Skuratov D.L., Fedorov D.G. Thermal Fields in the End Milling of VT6 Titanium Alloy with Cooling // Russian Engineering Research, 2014. – V. 35, No. 10. – P. 773–776.
4. Evdokimov D.V., Skuratov D.L., Fedorov D.G. Influence of Tool Wear on the Heat Flux Distribution and Temperature at the Contact Surfaces in the End Milling of OT4 Titanium Alloy // Russian Engineering Research, 2016. – V. 36, No. 4. – P. 324–327.
5. Skuratov D.L., Evdokimov D.V., Fedorov D.G. Thermal Stress Research of Processing and Formation of Residual Stress When End Milling of a Workpiece // World Applied Sciences Journal, 2014. – V. 31 (1). – P. 51–55.
6. Zhongtao, F., Y. Wenyu, W. Xuelin and L. Jürgen. Analytical modeling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory // Procedia CIRP, 2015. – V. 31. – P. 258–263.

### RESEARCH OF THE FRICTION COEFFICIENT OF TITANIUM AND INSTRUMENTAL ALLOYS. DRY AND BOUNDARY FRICTION

© 2020 D.V. Evdokimov, M.A. Oleynik

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The results of processing a field experiment to determine the coefficient of friction between titanium alloys and a hard alloy are presented. During the experiment, the speed of the bodies of the participants of the friction pair, as well as the strength of their pressing against each other, was varied. Friction took place both in the conditions of coolant supply and without it. The data processing resulted in empirical dependences that, depending on the conditions of friction, allow one to obtain the value of the coefficient of friction.

*Keywords:* mechanical processing, friction coefficient, titanium alloy, tribology, empirical dependences, coolant supply.