

нормируемых показаний качества. Разработаны мероприятия и проводятся работы по внедрению систем:

- Techcard – предназначена для комплексной автоматизации ТТП;
- Search – предназначена для создания и внедрения архива технологической документации и управления его документооборотом;
- IMBASE – управление справочными данными.

#### Список літератури

1. Лідери XXI століття. ГП ЗМКБ «Прогресс» ім. академіка А.Г. Івченко, - стр 11
2. Балабанов А.Н., Канарчук В.Е. Справочник технолога мелкосерийных и ремонтных производств. - стр.13
3. Мямица А.К. Технологическая подготовка производства мотогондолы самолета АН 74ТК-300 на базе оборудования с ЧПУ и аналитических эталонов. - Вестник двигателестроения №1/2003, стр. 13
4. Жеманюк П.Д., Мозговой В.Ф., Мигунов В.М. Направления и этапы сотрудничества технологической службы завода с НИИ, ОКБ и другими разработчиками новых технологий, - Технологические системы №3/2001, стр.18
5. Авиастроение. Качество, сертификация и лицензирование. /Под редакцией д.т.н. Безъязычного В.Ф., - М. Машиностроение 2003, стр. 302, 357
6. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей. /Под редакцией Братухина А.Г., Язова Г.К., Карасева Б.Е., - М. Машиностроение 1977, стр. 62, 359
7. Старик Д.Э., Парамонов Ф.И., Бугаков И.И. Экономика, организация и планирование авиационного производства, - М. Машиностроение 1976, стр. 176
8. В.В. Крымов. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора технических наук, - Москва 1999, стр. 4

#### УДК 621.9

**Ю.Н. Внуков, д-р техн.наук, проф., А.Г. Саржинская, асп.**  
Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

### **ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КОНТАКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА СО СТРУЖКОЙ НА УДЕЛЬНУЮ СИЛУ ТРЕНИЯ**

---

*Розглянуто залежність питомої сили тертя від параметрів процесу різання. Наведено опис експериментів, які демонструють незалежність величини  $q_F$  від температури контакту, адгезійної та рельєфної активності інструмента та розміру карбідної фази в заданому діапазоні температур та швидкостей обробки.*

*Cutting process parameters dependence of specific friction force is considered. The description of experiments showing  $q_F$  amount independence from contact temperature, adhesion and relief activity of cutting tool and carbide phase extent at given temperature and cutting speed range is adduced.*

---

Система сил, действующих на инструмент, является замыкающим звеном сложной многокомпонентной системы процесса резания, охватывающей большое количество взаимосвязанных факторов, начиная контактными процессами в зоне резания и заканчивая механизмами станка и точностью получаемых после обработки деталей. Поскольку современный уровень развития вычислительной техники и

информационных технологий позволяет изучать процессы, протекающие в зоне резания, и проектировать металлорежущие станки и оборудование при помощи математических моделей (без проведения трудоемких экспериментов), аналитическое определение сил резания является одной из наиболее актуальных задач. На сегодняшний день существует целый ряд методик аналитического расчета сил резания [1]. Для их успешного применения необходимо уметь определять контактные характеристики процесса резания, среди которых одной из ключевых является удельная сила трения на передней поверхности инструмента  $q_F$ .

Изучению величины удельной силы трения на передней поверхности инструмента  $q_F$  уделялось большое внимание в работах многих ученых, однако до сих пор не существует единого мнения не только о математическом выражении этой величины, но также и о характере ее распределения и зависимости от параметров процесса резания.

Целый ряд ученых придерживается мнения о постоянстве удельной силы трения  $q_F$  и ее независимости от большинства факторов, интенсивно влияющих на процесс резания (режимы резания, свойства инструментального материала, геометрия инструмента и т.д.). Впервые отсутствие влияния на величину  $q_F$  температуры контакта было обнаружено Н.Н. Зоревым [2]. В дальнейшем это было подтверждено работами М.Ф.Полетики [3], А.М.Розенберга [4], В.А.Остафьева [5] и др., с той лишь разницей, что авторы по-разному объясняли данное явление (Н.Н. Зорев считал, что причиной постоянства является конкурирующее влияние на контактные напряжения процессов деформационного упрочнения и температурного разупрочнения обрабатываемого материала, а авторы [3,4,5] объясняли это явление кратковременностью процесса нагрева обрабатываемого материала и большей инерционностью процессов структурных преобразований в материале детали по отношению ко времени воздействия на него высоких температур).

Наиболее полно величина  $q_F$  была изучена М.Ф. Полетикой [3]. В результате обработки данных многочисленных экспериментов им было установлено, что удельная сила трения на передней поверхности (которая представляет собой частное от деления силы трения на номинальную площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента  $q_F = F/b \cdot c$ , где  $b$  – ширина стружки,  $c$  – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента) зависит только от свойств обрабатываемого материала, а именно, от величины действительно (истинного) напряжения при разрыве –  $q_F = 0,28S_k$ .

Однако существует и другая точка зрения. Так, В.С.Кушнер [6] считает, что величина  $q_F$  переменна и зависит от действительного предела прочности при растяжении обрабатываемого материала  $S_b$  и средней температуры на передней поверхности инструмента  $\bar{\theta}_{III}$

$$q_F = S_b \left( 1 - 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{\theta}_{III} \right).$$

По его мнению, неоднородность температурного поля, характерная для обработки с высокими скоростями, служит причиной изменения напряжений как в зоне стружкообразования, так и на передней поверхности инструмента. Это ведет к нарушению равновесия термодинамической системы «резец – стружка – деталь» и оказывает влияние на весь процесс резания.

Аналогичного мнения придерживается и Ю.А.Розенберг [7], однако он считает, что температура влияет на величину среднего касательного напряжения на передней поверхности гораздо в меньшей степени по сравнению с данными работы [6]

$$q_F = S_b [0,4 - 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot (\bar{\theta}_{III} - 600)].$$

В настоящей статье приведены экспериментальные исследования влияния различных характеристик инструментального материала (теплопроводность, адгезионная и рельефная активность) на величину удельной силы трения  $q_F$ .

Рассматривали свободное прямоугольное резание (трубы) резцом, оснащенным пластиной из быстрорежущей стали Р6М5 (обрабатываемый материал – сталь 45, глубина резания 1,6 мм; подача 0,3 мм; передний угол инструмента 10°; задний угол 8°; главный угол в плане 90°). Конструкция пластины позволяет производить как нагрев, так и охлаждение ее контактных поверхностей (путем введения нагревателя или пропускания охлажденной жидкости через внутреннее отверстие в режущей пластине). Описание экспериментальной установки приведено в работе [8].

Для исследования влияния температуры на передней поверхности на контактные характеристики процесса резания было проведено три серии опытов: без нагрева передней поверхности и с дополнительным подогревом до температур 250°С и 400 °С. Дополнительный подогрев пластины изнутри препятствует оттоку тепла через переднюю поверхность, моделируя тем самым условия уменьшения теплопроводности инструментального материала. В таблице 1 приведены результаты эксперимента для скоростей, исключающих образование нароста (т.е.  $\gamma = const$ ). Величина сил на задней поверхности инструмента в расчетах не учитывалась в силу их малой величины (обусловленной большой толщиной срезаемого слоя).

Значения усадки стружки, составляющих силы резания и длины контакта были получены при помощи измерений, а величины средних контактных напряжений и коэффициента трения рассчитаны согласно схеме сил, действующих на передней поверхности (рис. 1) по формулам (1) – (3):

- среднее контактное давление

$$q_N = \frac{P_1 \cos \gamma - P_2 \sin \gamma}{b_1 \cdot C} \quad (1)$$

- средний коэффициент трения

$$\mu = \frac{P_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma + P_2}{P_1 - P_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma} \quad (2)$$

- удельная сила трения

$$q_F = q_N \cdot \mu, \quad (3)$$

где  $P_1$  – вертикальная составляющая силы резания на передней поверхности, Н;  
 $P_2$  – горизонтальная составляющая силы резания на передней поверхности, Н;  
 $\gamma$  – передний угол инструмента, град;  
 $b_1$  – ширина стружки, мм;  
 $c$  – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента, мм.

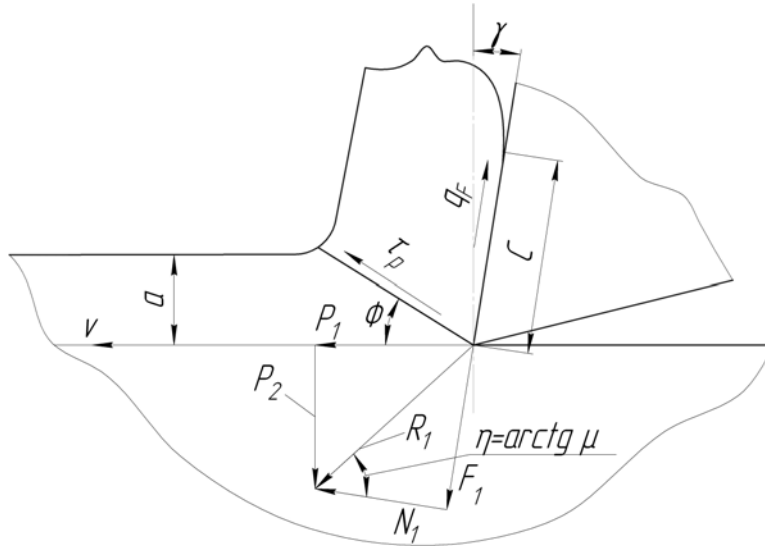


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на передней поверхности инструмента.

Таблица 1  
 Контактные характеристики при резании с нагревом передней поверхности

Температура подогрева передней поверхности, Т°С	Скорость резания v, м/с	Усадка стружки	Составляющие силы резания, Н		Длина контакта c, мм	Относительная длина контакта c/a	Среднее контактное давление $q_N$ , Н/мм <sup>2</sup>	Средний коэффициент трения $\mu$	Удельная сила трения $q_F$ , Н/мм <sup>2</sup>
			$P_1$	$P_2$					
20	0,67	3,50	1425	930	2,30	7,7	359	0,94	337
250		3,20	1375	710	1,80	6,0	365	0,90	328
400		2,95	1060	630	1,65	5,5	376	0,86	323
20	0,83	3,00	1310	800	2,10	7,0	364	0,88	320
250		2,85	1200	660	1,70	5,7	417	0,80	334
400		2,45	1000	540	1,40	4,7	423	0,79	334

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показывает, что, несмотря на то, что температура контакта стружки с передней поверхностью инструмента все-таки влияет на контактные характеристики процесса резания (с изменением температуры изменяются среднее контактное давление, средний коэффициент трения, усадка стружки, длина контакта), удельная сила трения  $q_F$  при этом остается неизменной (средняя величина удельной силы трения составляет 329 Н/мм<sup>2</sup> ( $\pm 2,5\%$ )). Это свидетельствует о том, что в контактных слоях обрабатываемого материала не

происходит явление их разупрочнения. Что же касается изменения остальных контактных характеристик, это можно объяснить влиянием «вторичных» структур активных компонентов среды (воздуха) на участке упругого контакта, появившихся в результате дополнительного нагрева передней поверхности. При повышении температуры контакта на передней поверхности инструмента образуются окисные пленки, препятствующие схватыванию материала стружки с резцом, в результате чего уменьшается длина контакта, а, следовательно, увеличивается среднее контактное давление, уменьшается средний коэффициент трения и усадка стружки. Данное предположение подтверждается экспериментами по оценке сил адгезии (схватывания), которые выполнялись на трибометре согласно методике автора [8] при контактировании образцов из стали 45 и быстрорежущей стали Р6М5. В случае, когда поверхность образца из Р6М5 была очищена от окислов и адсорбентов, наблюдалась сила адгезии (схватывания) во много раз выше, чем при наличии на образце из быстрорежущей стали окисных пленок после его нагрева. Исходя из вышесказанного, можно сделать заключение, что температура контакта влияет на контактные характеристики не через изменение сопротивления сдвигу (температурное разупрочнение), а путем изменения условий трения (снижение схватывания с обрабатываемым материалом вследствие образования окисных пленок).

Результаты измерения контактных характеристик в случае охлаждения передней поверхности при тех же условиях обработки показали, что в заданном диапазоне температур (до +4градС) охлаждение принципиально не влияет на условия контакта и контактные характеристики.

При исследовании влияния на контактные характеристики фрикционной (контактной) активности инструментального материала рассматривали две ее составляющие – адгезионную (способность материала инструмента к схватыванию или химическому соединению с материалом стружки) и рельефную (влияние микрогеометрии рельефа инструментального материала на затормаживание контактирующих с ним слоев обрабатываемого материала) активность.

Для оценки влияния адгезионной составляющей эксперименты проводились при резании стали 45 (имеющей несколько более высокую твердость, чем в предыдущих опытах) инструментом, оснащенным пластинами из быстрорежущей стали Р6М5 с покрытием из нитрида титана TiN и без покрытия (скорость резания 0,83 м/с; глубина резания 1,5 мм; подача 0,3 мм; передний угол инструмента 10°; задний угол 8°; главный угол в плане 90°). Для исключения влияния рельефной активности была достигнута одинаковая шероховатость передней поверхности у инструментов с покрытием и без. Анализ результатов экспериментов, приведенных в таблице 2, показывает, что при резании инструментом с покрытием по сравнению с инструментом без покрытия изменяются все параметры процесса резания (усадка стружки, составляющие силы резания, длина контакта и средний коэффициент трения снижаются, а среднее контактное давление растет), в то время как удельная сила трения остается постоянной (среднее значение  $q_F$  составляет 410 Н/мм<sup>2</sup>(±0,25%)), что свидетельствует об ее

инвариантности к условиям трения (которые меняются в данном случае при нанесении покрытия).

Таблица 2

Влияние адгезионной активности инструментального материала на контактные характеристики и усадку стружки.

№ пп	Материал резца	Усадка стружки	Составляющие силы резания, Н		Длина контакта с, мм	Относительная длина контакта с/а	Среднее контактное давление $q_N$ , Н/мм <sup>2</sup>	Средний коэффициент трения $\mu$	Удельная сила трения $q_F$ , Н/мм <sup>2</sup>
			$P_1$	$P_2$					
1	P6M5	3,60	1720	1100	2,10	7,0	447	0,92	411
2	P6M5+TiN	2,80	1380	660	1,35	4,5	576	0,71	409

При нанесении на покрытие из нитрида титана дополнительного адгезионно – активного к обрабатываемому материалу (сталь45) слоя (методом КИБ напыляли пленку из стали45 толщиной 10мкм) с целью изменения условий адгезии (схватывания) было установлено, что адгезионно – активный слой (ААС) существенно влияет на условия контакта стружки с передней поверхностью. В результате этого влияния увеличивается длина контакта, а, следовательно, уменьшается среднее контактное давление  $q_N$ . увеличивается усадка стружки и составляющие силы резания. При этом, однако, удельная сила трения при резании с ААС значительно ниже, чем при резании инструментом с покрытием, но без ААС (см. табл. 3). Таким образом, данный эксперимент не только подтверждает гипотезу об инвариантности удельной силы трения к условиям процесса резания, но также доказывает ее связь с характеристиками обрабатываемого материала (как было показано в работе [3]), т.к. более низкие значения  $q_F$ , полученные при обработке инструментом с ААС, объясняются дополнительным пластическим течением более мягкого (по сравнению с деформированным материалом стружки) материала ААС.

Таблица 3

Влияние нанесения адгезионно-активных слоев на контактные характеристики и усадку стружки

№ пп	Материал поверхности инструмента	Скорость резания v, м/с	Усадка стружки	Составляющие силы резания, Н		Длина контакта с, мм	Относительная длина контакта с/а	Среднее контактное давление $q_N$ , Н/мм <sup>2</sup>	Средний коэффициент трения $\mu$	Удельная сила трения $q_F$ , Н/мм <sup>2</sup>
				$P_1$	$P_2$					
1	TiN	0,67	3,03	1432	569	0,93	3,10	610	0,62	378
2	TiN+ААС		3,42	1618	706	1,42	4,74	412	0,66	271
3	TiN	0,83	2,88	1392	559	0,97	3,23	554	0,62	343
4	TiN+ААС		3,38	1530	745	1,46	4,87	380	0,72	274

Для исследования влияния рельефной активности были проведены измерения основных контактных характеристик и усадки стружки при резании жаропрочного сплава на основе железа ХН35ВТЮ резцами с пластинками из быстрорежущей стали Р6М5Ф3 (глубина резания 1 мм; подача 0,39 мм/об; передний угол 10°; главный угол в плане 45°), полученной разными способами и имеющей различный размер и распределение карбидной фазы (размер карбидов составляет: Р6М5Ф3МП 1÷2 мкм; Р6М5Ф3 10÷15 мкм; Р6М5Ф3МП+20% TiC 15÷20 мкм, с одновременным увеличением количества карбидов). Результаты экспериментов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние величины карбидной фазы быстрорежущей стали Р6М5Ф3 на контактные характеристики и усадку стружки

№ пп	Материал поверхности инструмента	Скорость резания $v$ , м/с	Усадка стружки	Составляющие силы резания, Н		Длина контакта $s$ , мм	Среднее контактное давление $q_N$ , Н/мм <sup>2</sup>	Средний коэффициент трения $\mu$	Удельная сила трения $q_F$ , Н/мм <sup>2</sup>
				$P_1$	$P_2$				
1	Р6М5Ф3МП	0,05	3,75	1680	1000	0,978	1197	0,595	712
2	Р6М5Ф3		3,60	1660	974	0,932	1240	0,586	727
3	Р6М5Ф3МП+20% TiC		3,55	1640	884	0,869	1314	0,539	708
4	Р6М5Ф3МП	0,067	3,56	1640	968	0,942	1213	0,590	716
5	Р6М5Ф3		3,37	1620	939	0,900	1255	0,579	727
6	Р6М5Ф3МП+20% TiC		3,42	1600	856	0,835	1334	0,535	714
7	Р6М5Ф3МП	0,083	3,33	1600	913	0,898	1241	0,570	708
8	Р6М5Ф3		3,37	1590	890	0,868	1276	0,559	714
9	Р6М5Ф3МП+20% TiC		3,22	1580	832	0,819	1344	0,527	708
10	Р6М5Ф3МП	0,117	3,25	1580	877	0,862	1270	0,554	708
11	Р6М5Ф3		3,12	1560	869	0,836	1300	0,557	724
12	Р6М5Ф3МП+20% TiC		3,06	1500	783	0,774	1350	0,522	705

Анализ данных таблицы 4 показывает, что с увеличением размеров и количества карбидной фазы в составе быстрорежущей стали от Р6М5Ф3 до Р6М5Ф3МП+20% TiC снижается длина контакта, увеличивается среднее контактное давление, что приводит к снижению среднего коэффициента трения и усадки стружки. При этом удельная сила трения  $q_F$  остается постоянной величиной с незначительным отклонением 714Н/мм<sup>2</sup> ( $\pm 2\%$ ), и, следовательно, не зависит от размеров и количества карбидной фазы.

Таким образом, в ходе данного исследования было установлено, что в заданном диапазоне температур и скоростей резания (исключая образование нароста) удельная сила трения  $q_F$  не зависит от температуры контакта, от адгезионной и рельефной активности инструмента и определяется только свойствами обрабатываемого материала.

## Список літератури

1. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Анализ особенностей различных подходов при аналитическом расчете сил резания // Современные технологии в машиностроении – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008, №1 540с.
2. Развитие науки о резании металлов/ Под ред. Н.Н.Зорева. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
3. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 152 с.
4. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – К.: Наукова думка, 1990. – 320 с.
5. Физические основы процесса резания металлов. / Под ред. Остафьева В.А. – Киев: Вища школа, 1976. – 136 с.
6. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных металлов. – Иркутск: Иркутск. ун-т., 1982. – 180 с.
7. Розенберг Ю.А. Резание материалов. – Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат», 2007. – 294с.
8. Внуков Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследования их трения с обрабатываемыми материалами и реализации новых технологических возможностей: Дис. докт. техн. наук: 05.03.01. – М., 1992. – 371 с.

## УДК 621.923

**А.И. Грабченко д-р техн. наук, В.Л. Доброскок д-р техн. наук,  
В.А. Федорович д-р техн. наук, И.Н. Пыжов канд. техн. наук,  
Я.Н.Гарщенко канд. техн. наук,  
НТУ "Харьковский политехнический институт", г.Харьков, Украина**

### **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КРУГОВ НА ОСНОВЕ МИКРОПОРОШКОВ АЛМАЗА ПРИ ЧИСТОВОЙ ЗАТОЧКЕ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ ПСТМ**

---

*Подано результати дослідження процесу чистової заточки інструментів з надтвердих матеріалів з використанням струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу. Дослідження виконувалося на основі методології 3D моделювання напружено-деформованого стану зони шліфування, статистичного моделювання і об'єктно-орієнтованого статистичного моделювання абразивно-алмазних інструментів.*

*Results of research of process of finish sharpening of tools from superhard materials with use of current-carrying wheels on the basis of diamond flour grains are submitted. Researches were carried out on a basis methodologies 3D modelling deflected mode of a grinding zone, statistical modelling and object-oriented statistical modelling of abrasive-diamond tools.*

---

**Постановка проблеми.** Известно, что качество подготовки рабочих элементов лезвийных инструментов для процесса обработки материалов резанием имеет первостепенное значение [1, 2, 3]. Это в особой мере относится к случаю использования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) – на основе алмаза и нитрида бора, обладающих чрезвычайно высокой микротвердостью и повышенной хрупкостью. При их заточке могут возникать значительные локальные динамические силовые и температурные напряжения, приводящие к возникновению микротрещин и сколов на режущих кромках.