

УДК 621.923.6

DOI: [10.12737/article_59cd768176efe4.43678555](https://doi.org/10.12737/article_59cd768176efe4.43678555)

В.А. Панайоти

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРИ ШЛИФОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОК

Рассмотрено влияние твердой смазки на температурный процесс при шлифовании различных марок быстрорежущей стали эльборовыми кругами. Выявлены закономерности изменения контактной температуры при обработке на различных режимах резания и представлены эмпирические зависимости, что позволяет обоснованно на-

значать условия обработки. Показана эффективность применения твердой смазки и даны рекомендации для ее эффективного применения.

Ключевые слова: твердая смазка, эльборовый круг, контактная температура, быстрорежущая сталь, коэффициент обрабатываемости, режимы резания.

V.A. Panaioty

INVESTIGATION OF HEAT MODE AT GRINDING USING SOLID LUBRICANTS

The paper reports the investigation of a solid lubricants impact upon a temperature process at different high-speed steel grinding with cBN disks. Temperature measurements were carried out with the aid of an artificial thermocouple. Solid lubricant was applied upon a disk cutting surface with a ceramic bond in the course of processing with the aid of a special device. As a basis of the lubricant composition chosen there was used hexagonal boron nitride. The regularities of contact temperature changes during the machining in different modes (velocity of cBN disk, traverse feed and cross-feed) were revealed, and also an impact upon chemical structure temperature of high-speed steel was

defined for that a machinability factor was used. As a result of experiments were obtained regularities of contact temperature changes in different cutting modes and were presented empirical dependences which allow setting reasonably working conditions. The efficiency of solid lubricant use is shown the application of which allows decreasing thermal process stress almost twice and the recommendations for its efficient application under conditions of production are given.

Key words: solid lubricant, cBN disk, contact temperature, high-speed steel, machinability factor, cutting modes.

Введение

Тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования, оказывают значительное влияние как на протекание процесса, так и на качество поверхности обрабатываемого материала [1-4]. Затрачиваемая при снятии стружки, трении и деформациях работа переходит в тепло, которое создает в зоне контакта абразивного круга и обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали поле с высокими температурами [4]. Деформация и нагрев металла происходит очень быстро (за доли секунды), и основное количество тепловой энергии концентрируется в тонком поверхностном слое шлифуемой детали. Этому способствует и сравнительно низкая теплопроводность быстрорежущих сталей. По-

сле прохождения абразивного инструмента происходит быстрое охлаждение поверхностного слоя обрабатываемого металла. Такие температурные перепады, как правило, приводят к структурным изменениям в тонком поверхностном слое шлифуемого металла, вызывают появление остаточных напряжений [5-7].

Для оценки тепловых явлений при шлифовании и их влияния на состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала необходимо знать температуру в зоне контакта абразивного инструмента с деталью, т.е. контактную температуру поверхности детали, а также распределение температуры от шлифуемой поверхности вглубь металла.

Методика эксперимента

Для измерения осредненной контактной температуры шлифования использовали искусственную термопару. В этом случае две проволоочки диаметром 0,1 мм располагали одну строго над другой. Электроды изолировались прокладками слюды толщиной 0,02 мм и располагались между двумя пластинками образца материала. Для размещения комплекта из проволок термопары и слюды в нижней пластине обрабатываемого материала вышлифовывалась канавка тонким алмазным кругом. При шлифовании абразивные зерна стягивают на обрабатываемую поверхность металл электродов и образуют горячий спай термопары. Обоснованием метода служит закон промежуточных металлов, который гласит, что «алгебраическая сумма термо-ЭДС в электрической сети, состоящей из любого числа проводников из разнородных металлов, находящихся при одной и той же температуре, равна нулю».

В качестве искусственной термопары были выбраны хромель-алюмель. Эта тер-

мопара имеет широкий диапазон рабочих температур (от 0 до 1100 °С). При температуре до 600 °С она конкурирует с железо-константановой парой, отличаясь меньшей чувствительностью, но большей линейностью. В диапазоне 600-1100 °С это наиболее применяемая термопара. Сплав хромель содержит 90% никеля и 10% хрома, а алюмель состоит из 94% никеля, 3% марганца, 2% алюминия и 1% кремния.

Исследования проводили на модернизированном станке модели 3А64Д, оснащенный приспособлением для нанесения твердой смазки в процессе обработки. Шлифовали закаленные быстрорежущие стали эльборовыми чашечными кругами ЛЧК 125x32x10x5 на керамической связке С10 различной зернистости и твердости, концентрации 100% структуры №8. Твердую смазку составляли из нескольких компонентов с различной температурой плавления на основе гексагонального нитрида бора [8].

Результаты экспериментов

Было проведено исследование влияния режима резания на контактную температуру поверхности быстрорежущей стали различных марок при шлифовании с применением твердого смазочного материала предложенной композиции.

На величину контактной температуры поверхности шлифуемой детали большое влияние оказывает поперечная подача. На рис. 1 представлен график изменения контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной поперечной подачей (продольная подача - 1 м/мин, скорость резания - 19 м/с). С увеличением поперечной подачи температура на поверхности детали монотонно возрастает. Так, с ростом этой подачи от 0,01 до 0,06 мм/дв.ход температура в зоне контакта

смазанного круга и стали повышается с 120 до 550 °С. При обработке же в обычных условиях контактная температура увеличивается от 240 до 820 °С соответственно. Следовательно, в случае нанесения на режущую поверхность эльборового круга смазочного материала величина контактной температуры намного ниже, чем при шлифовании без применения ТСМ. Так, при поперечной подаче 0,04 мм/дв.ход контактная температура поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании с ТСМ равна 380 °С, т.е. в 1,7 раза меньше, чем при шлифовании без его применения (630 °С). Такое значительное снижение величины контактной температуры можно объяснить уменьшением тепловой мощности, выделяемой в зоне резания [9; 10].

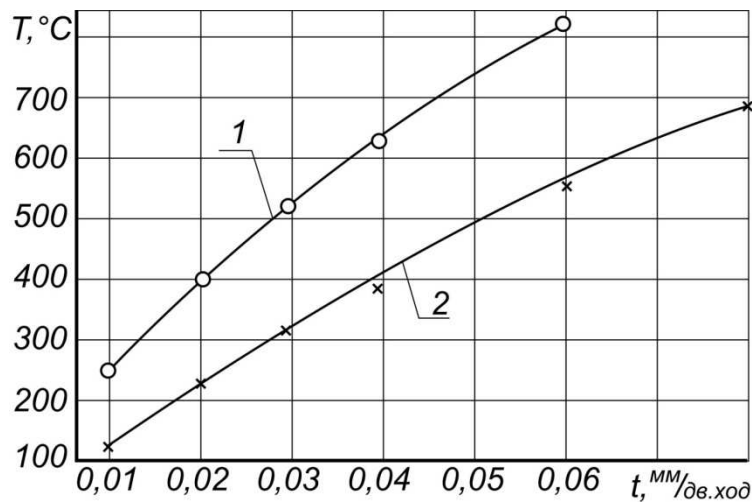


Рис. 1. Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной поперечной подачей ($V=19$ м/с, $S = 1$ м/мин): 1 - без ТСМ; 2 - с ТСМ

Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании с различной продольной подачей показано на рис. 2. С увеличением продольной подачи контактная температура также повышается. При шлифовании смазанным эльборовым кругом эта температура ниже, чем при обработке без использования ТСМ. Так, при продольной подаче 0,5 м/мин температура поверхности образца в условиях обработки с применением смазочного материала и без него соответственно равна 150 и 320 °С. Введение в зону резания смазочной композиции способствует снижению контактной температуры поверхности детали в данных условиях в 1,5-2 раза.

Степень влияния поперечной и продольной подачи на контактную температуру определяли, сравнивая её значения при

изменении интенсивности шлифования с 70 до 140 мм³/мин. Нижний уровень интенсивности шлифования достигается при работе с поперечной подачей, равной 0,02 мм/дв.ход, и продольной подачей 1 м/мин. Прирост интенсивности шлифования обеспечивали увеличением значения одной из подач, либо продольной, либо поперечной. Экспериментальные данные представлены в табл. 1.

Из представленных экспериментальных данных видно, что повышение продольной подачи, несомненно, более предпочтительно по сравнению с увеличением поперечной подачи. Если с ростом продольной подачи контактная температура при шлифовании смазанным кругом увеличивается в 1,3 раза, то с увеличением поперечной подачи – в 1,7 раза.

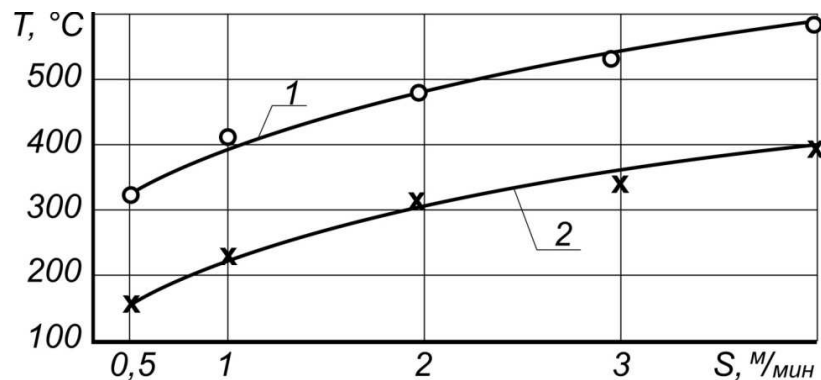


Рис. 2. Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной продольной подачей ($V=19$ м/с, $t = 0,02$ мм/дв.ход): 1 - без ТСМ; 2 - с ТСМ

Таблица 1

Влияние подач на контактную температуру поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 ($V = 19$ м/с)

Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход	Интенсивность шлифования, мм/мин	Контактная температура ($^{\circ}\text{C}$) при шлифовании	
			с ТСМ	без ТСМ
1	0,02	70	220	400
1	0,04	140	380	630
2	0,02	140	280	470

Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной скоростью резания показано на рис. 3. Видно, что при шлифовании с нанесением смазочного материала на режущую поверхность круга, а также без его применения увеличение скорости резания от 13 до 38 м/с приводит к повышению величины контактной температуры поверхности обрабатываемой стали в 2-2,1 раза. Это обуслов-

лено увеличением тепловой мощности шлифования, выделяемой в зоне контакта, так как её величина зависит от тангенциальной составляющей силы резания, которая при шлифовании смазанным кругом уменьшается приблизительно в 2 раза. Так, при скорости круга, равной 26 м/с, контактная температура поверхности детали при введении в зону резания смазочной композиции уменьшается с 500 до 280 $^{\circ}\text{C}$, т.е. в 1,8 раза.

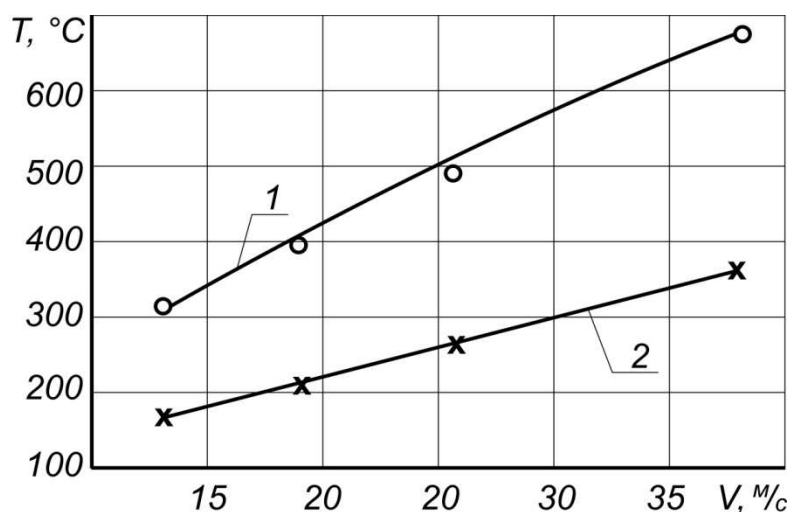


Рис. 3. Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной скоростью резания ($S = 1$ м/мин, $t = 0,02$ мм/дв.ход): 1 - без ТСМ; 2 - с ТСМ

Химический состав быстрорежущих сталей не оказывает существенного влияния на величину контактной температуры шлифования (рис. 4). При увеличении коэффициента легированности стали от 1 (сталь Р18) до 1,92 (сталь Р12Ф3К10М3) контактная температура шлифования возросла всего на 80 $^{\circ}\text{C}$, как при обработке с применением смазочного материала, так и

без него. Однако при шлифовании смазанными кругами из всех быстрорежущих сталей наблюдается снижение контактной температуры в 1,8-1,9 раза. Так, при шлифовании стали Р6М5 ($K_L = 1,02$) контактная температура в случае применения ТСМ уменьшается с 390 до 200 $^{\circ}\text{C}$, а стали Р12Ф3К10М3 ($K_L = 1,92$) — с 460 до 280 $^{\circ}\text{C}$.

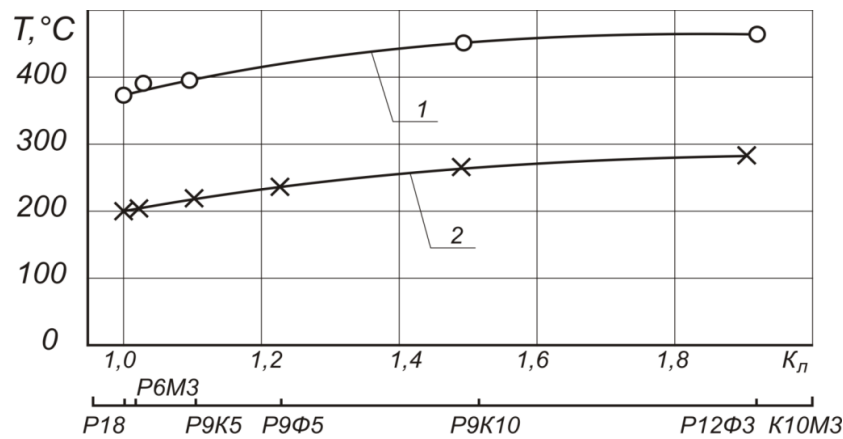


Рис. 4. Контактная температура поверхности различных марок быстрорежущей стали при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 ($V=19$ м/с, $S = 1$ м/мин, $t = 0,02$ мм/дв.ход): 1 - без ТСМ; 2 - с ТСМ

Обобщенные зависимости изменения температуры

Получены экспериментальные зависимости изменения контактной температуры от технологических факторов (режимов резания) и коэффициента обрабатываемости быстрорежущей стали разного химического состава. Обобщенные зависимости показателей процесса шлифования от технологических факторов описываются функцией типа

$$T = C_n \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^z \cdot K_M$$

где C - коэффициент пропорциональности; t - поперечная подача, мм/дв.ход; S - продольная подача, м/мин; V - скорость резания, м/мин; K_M - коэффициент, определяющий влияние марки быстрорежущей стали.

Значения коэффициента пропорциональности и степени зависимости от технологических факторов представлены в табл. 2, а значения коэффициента марки быстрорежущей стали - в табл. 3.

Таблица 2

Значения коэффициента пропорциональности и степени зависимости от режимов резания

Шлифование	Постоянный коэффициент и степени зависимости			
	C	x	y	z
Со смазкой	$9,97 \cdot 10^3$	0,84	0,41	0,68
Без смазки	$1,05 \cdot 10^4$	0,68	0,28	0,70

Таблица 3

Значения коэффициента материала [2]

Марка стали	P18	P6M5	P9K5	P9K10	P12Ф3K10M5
Коэффициент K_M^*	0,95/0,95	0,95/0,95	0,98/0,97	1,03/1,08	1,08/1,17

*В числителе указаны коэффициенты при шлифовании со смазкой, в знаменателе - без смазки. Коэффициент для быстрорежущей стали марки P9Ф5 принят за 1.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ показал, что введение смазочного материала в поры эльборового круга приводит к значительному снижению температуры в зоне

шлифования, и позволил определить закономерности ее изменения в зависимости от технологических факторов и химического состава быстрорежущей стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: кол. моногр. / А.С. Верещагин [и др.]. - М., 2015. - Т. V. - С. 228-264.
2. Панайоти, В.А. Повышение эффективности и качества при шлифовании быстрорежущих сталей с использованием твердых смазок / В.А. Панайоти // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. - 2016. - № 2 (316). - С. 87-91.
3. Панайоти, В.А. Исследование геометрии рельефа режущей поверхности эльборового круга при шлифовании с твердой смазкой / В.А. Панайоти // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. - 2016. - № 1 (315). - С. 67-71.
4. Панайоти, В.А. Исследование влияния твердой смазки на поверхностное упрочнение инструментов из быстрорежущей стали при заточке / В.А. Панайоти // *Вестник Брянского государственного технического университета*. - 2016. - № 2 (50). - С. 41-45.
5. Панайоти, В.А. Исследование структурных превращений в быстрорежущих сталях при шлифовании с применением твердых смазок / В.А. Панайоти // *Автоматизация и современные технологии*. - 2017. - № 2. - С. 55-60.
6. Панайоти, В.А. Влияние твердых смазок на фазовый состав шлифованной поверхности быстрорежущих сталей / В.А. Панайоти // *IV международная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» / ИМАШ РАН*. - М.: Спектр, 2015. - С. 189-191.
7. Панайоти, В.А. Влияние твердой смазки на поверхностное упрочнение инструментов из быстрорежущей стали эльборовыми кругами различной зернистости / В.А. Панайоти // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. - 2017. - № 2 (322). - С. 106-109.
8. Панайоти, В.А. Исследование методов нанесения твердой смазки на поверхность шлифовального круга в процессе обработки / В.А. Панайоти // *СТИН*. - 2016. - № 10. - С. 26-29.
9. Панайоти, В.А. Оценка смазывающей способности ТСМ по удельной работе шлифования / В.А. Панайоти // *Научно-технические материалы V11 междунар. науч.-техн. конф. (19-21 мая 2016 г.)*. - М.: Техполиграфцентр, 2016. - С. 160-161.
10. Панайоти, В.А. Оценка смазывающей способности ТСМ по составляющим силы резания / В.А. Панайоти // *Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие»: сб. избр. ст.* - 2017. - С. 19-27.

1. *Efficient Engineering Technologies, Equipment and Tools: monograph authors' group* / A.S. Vereshchagin [et al.]. - M., 2015. - T. V. - pp. 228-264.
2. Panaioti, V.A. Increase of efficiency and quality at high-speed steel grinding using solid lubricants / *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. - 2016. - No. 2 (316). - pp. 87 - 91.
3. Panaioti, V.A. Investigation of cutting surface geometry in cBN disk at grinding with solid lubricant / V.A. Panaioti // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Techniques*. - 2016. - No. 1 (315). - pp. 67-71.
4. Panaioti, V.A. Investigation of solid lubricant impact upon surface strengthening of high-speed tools at sharpening / V.A. Panaioti // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2016. - No. 2 (50). - pp. 41-45.
5. Panaioti, V.A. Investigation of structural changes in high-speed steel at grinding using solid lubricants / V.A. Panaioti // *Automation and Modern Techniques*. - 2017. - No. 2. - pp. 55-60.
6. Panaioti, V.A. Solid lubricant impact upon phase composition of high-speed steel ground surface /

- V.A. Panaioti // *the IV-th Inter. Conf. "Fundamental Investigations and Innovation Technologies in Mechanical Engineering"* / IMACH RAS. - M.: Spectrum, 2015. - pp. 189-191.
7. Panaioti, V.A. Solid lubricant impact upon tool high-speed surface strengthening with cBN disks of different granularity / V.A. Panaioti // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Techniques*. - 2017. - No. 2 (322). - pp. 106-109.
8. Panaioti, V.A. *Investigation of Solid Lubricant Application Methods on Abrasive Disk Surface during Processing* / V.A. Panaioti // *STIN*. - 2016. - No. 10. - pp. 26-29.
9. Panaioti, V.A. TSM lubricating ability assessment through specific grinding work / V.A. Panaioti // *Science Intensive Technologies at Modern Stage of Engineering Development: Proceedings of the VII-th Inter. Scientific Tech. Conf. (May 19-21, 2016)* - M.: Techpolygraphcenter, 2016. - pp. 160-161.
10. Panaioti, V.A. TSM lubricating capacity assessment on constituents of cutting force / V.A. Panaioti // *Proceedings of the Conf. SRI "National Development"* Proceedings - 2017. - pp. 19-27.

Статья поступила в редколлегию 15.09.17.
Рецензент: д.т.н., профессор Московского
технологического университета
Албагачиев А.Ю.

Сведения об авторах:

Панайоти Владимир Александрович, к.т.н., доцент Московского технологического университета (МИРЭА), тел.: +7 (495) 340-21-90; +7 (903) 573-52-73, e-mail: lek00@mail.ru.

Panaioti Vladimir Alexandrovich, Can. Eng., Assistant Prof., Moscow Technological University (MI-REA), e-mail: lek00@mail.ru.