

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.891+537.221+621.923

### О формировании показателей качества поверхностного слоя рабочей части инструмента при его заточке

**В.И. Бутенко, Р.Г. Кадач**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

#### *Аннотация*

Обобщены данные исследований теплофизических явлений при абразивной обработке деталей и определены возможности их применения при заточке металлорежущего инструмента. Показано, как способ заточки инструмента из быстрорежущей стали и твердых сплавов обуславливает качество его поверхностного слоя, а значит, и эффективность обработки. Приведены результаты соответствующих экспериментов. Установлено, что способ заточки рабочей части инструмента влияет на термо-ЭДС, которая возникает в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом и определяет формирование эксплуатационных показателей поверхностей обрабатываемых деталей.

**Ключевые слова:** корректировка режимов заточной операции, высотный параметр шероховатости, неровность поверхности рабочей части инструмента, стойкость сверл из быстрорежущей стали.

**Для цитирования.** Бутенко В.И., Кадач Р.Г. О формировании показателей качества поверхностного слоя рабочей части инструмента при его заточке. *Молодой исследователь Дона*. 2024;9(3):40–44.

### Formation of Quality Indicators of the Surface Layer of a Tool's Working Part during Sharpening

**Viktor I. Butenko, Roman G. Kadach**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

#### *Abstract*

The data from studies on thermophysical phenomena during abrasive processing of parts have been summarized, and the potential applications of this information for sharpening metal cutting tools have been identified. It has been shown how the method used to sharpen a tool made from high-speed steel or hard alloys affected the quality of the surface layer and, consequently, the efficiency of the process. The results from relevant experiments have been presented. It was found that the method employed for sharpening the working part of a tool influenced the thermal EMF that occurred in the contact area between the tool and the processed material, and this, in turn, determined the performance characteristics of the surfaces on the processed parts.

**Key words:** adjustment of sharpening operation modes, height parameter of roughness, unevenness of the surface of the working part of the tool, durability of high-speed steel drills

**For citation.** Butenko VI, Kadach RG. Formation of Quality Indicators of the Surface Layer of a Tool's Working Part during Sharpening. *Young Researcher of Don*. 2024;9(3):40–44.

**Введение.** Заточка рабочей части инструмента — это шлифование с высокими требованиями к обработанной поверхности. При этом инструментальные материалы на границах фаз будут неоднородны по структуре. В результате возникают предельные напряжения и скачки температур, приводящие к снижению эксплуатационных свойств. Этим обусловлена необходимость изучения имеющейся научной базы для более глубокого изучения факторов, от которых зависят показатели качества поверхностного слоя рабочей части металлорежущего инструмента при его заточке.

Цель исследования — дать рекомендации по повышению эффективности заточки в условиях абразивной обработки.

**Основная часть.** Основными характеристиками поверхностного слоя рабочих поверхностей инструментов после их заточки будем считать остаточные напряжения, микротвердость, шероховатость, износостойкость и термо-ЭДС. Данные показатели напрямую или косвенно зависят от состава и структуры инструментального материала, а также от температуры в зоне обработки. Особенности состава и структуры изучены в [1]. Автор пишет о возможности представления реальной поверхности инструментального материала в виде «поля пятен», на котором рабочая поверхность инструмента представлена чередованием различных структурных элементов (рис. 1). В твердых сплавах это зерна карбидов и связи, в быстрорежущих сталях — мартенсит, остаточный аустенит и зерна легированного цементита.

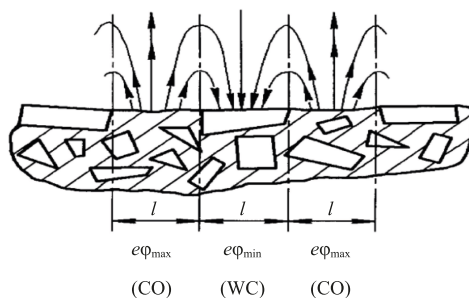


Рис. 1. «Поле пятен» рабочей поверхности режущей пластины из однокарбидного твердого сплава [1]

В указанных материалах свойства структурных составляющих различны как в механическом, так и в термодинамическом плане. Соответственно, они по-разному влияют на формирование показателей качества поверхностного слоя рабочей части инструмента при его заточке. На границах фаз такой гетерогенной структуры под действием силовых и тепловых нагрузок возникают предельные напряжения и скачки температур, ведущие к разрушению материала. Согласно теоретическим и экспериментальным оценкам интенсивности изнашивания инструментальных материалов, износ меньше, если при заточке получена меньшая величина начального термо-ЭДС [2]. Термо-ЭДС, возникающая в зоне резания, существенно влияет на микротвердость, технологические остаточные напряжения и распределение плотности дислокаций в материале поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Для уменьшения термо-ЭДС используют разные виды механического упрочнения [1] и способы заточки, меняющие условия контактного взаимодействия заточного круга и рабочей поверхности инструмента. Это влияет на коэффициент трения и дает возможность изменить эксплуатационные свойства и омическое сопротивление материала рабочей поверхности инструмента.

Из литературы известно, что от способа заточки сверл из быстрорежущей стали марки Р6М5 зависят термо-ЭДС  $U_{\text{эдс}}$  и средняя температура  $\Theta_{\text{ср}}$  в зоне контакта «обрабатываемая поверхность — заточной круг» (определяется методом естественной термодпары). В ходе экспериментов получили график зависимости средней температуры резания  $\Theta_{\text{ср}}$  от термо-ЭДС ( $U_{\text{эдс}}$ ) сверл из быстрорежущей стали при различных видах заточки (рис. 2). Анализ показал, что с увеличением средней температуры резания  $\Theta_{\text{ср}}$ , вызванном в том числе износом сверла, пропорционально растет термо-ЭДС ( $U_{\text{эдс}}$ ). Это верно при любом способе заточки инструмента.

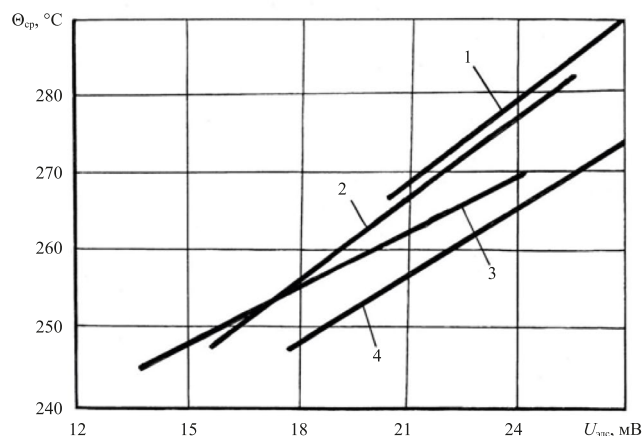


Рис. 2. Зависимость средней температуры резания  $\Theta_{\text{ср}}$  от термо-ЭДС ( $U_{\text{эдс}}$ ) сверл из быстрорежущей стали при заточке: 1 — абразивным кругом; 2 — электроалмазной заточке; 3 — абразивным кругом, импрегнированным диодидом хрома; 4 — алмазным кругом с подачей охлажденного ионизированного воздуха

При заточке сверл алмазным кругом с подачей в зону контакта охлажденного ионизированного воздуха (прямая 4 на рис. 3) максимальное значение средней температуры  $\Theta_{\text{ср}}$  оказалось ниже, чем при других способах. Схожие показатели зафиксировали при работе с абразивным кругом, импрегнированным диоксидом хрома (прямая 3 на рис. 2). Применение этих способов не требует больших дополнительных затрат, в связи с чем рекомендуется для любого типа производства.

При шлифовании на физико-механические свойства поверхностного слоя влияют теплообразование и пластическая деформация. Они возникают под действием сил резания в зоне обработки. Степень этого влияния определяется интенсивностью воздействия инструмента на деталь, временем контакта, скоростями относительного перемещения и некоторыми другими факторами.

Из [3] известно, что при шлифовании возникают два принципиально разных процесса формирования структуры поверхностного слоя — вторичная закалка и вторичный отпуск. Они определяются температурой и скоростями тепловых процессов в зоне обработки. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя и количества остаточного аустенита в нем при вторичной закалке и вторичном отпуске настолько значительны, что могут повысить микротвердость материала поверхностного слоя рабочей части инструмента при заточке, а также вызвать появление прижогов. Важно учитывать этот фактор при выборе способа заточки металлорежущего инструмента.

В рассматриваемых процессах особое значение имеет формирование технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя рабочей части. В зависимости от режима шлифования эти напряжения могут быть различными как по величине, так и по знаку. При легком режиме шлифования температура в зоне контакта незначительна, преобладающее влияние оказывают силы резания. В этом случае в граничных слоях возникают сжимающие напряжения [4]. С усилением интенсивности процесса повышение температуры в зоне обработки увеличивает пластичность обрабатываемого материала, и сжимающие напряжения переходят в растягивающие [4].

Рис. 3 иллюстрирует образование наклепа и остаточных напряжений, возникающих при воздействии зерна, жестко укрепленного на керамической или любой другой жесткой связке. Верхняя часть рис. 3 показывает, как на поверхностный слой обрабатываемого материала действуют остаточные напряжения сжатия. Нижняя часть рис. 3 дает представление о том, как на поверхностный слой влияет тепловой фактор. Он обуславливает перераспределение напряжений, что приводит к преобладанию растягивающих остаточных напряжений.

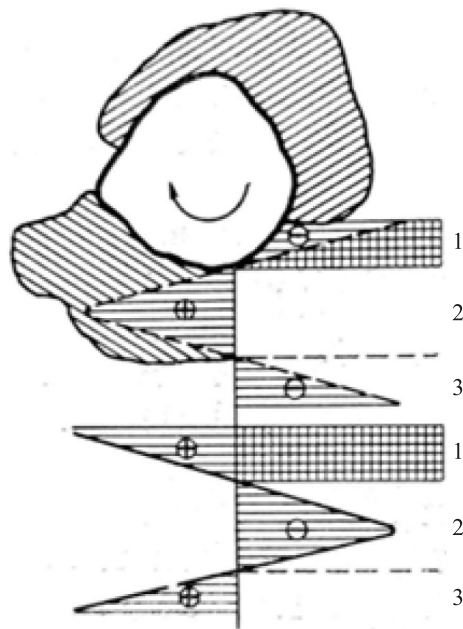


Рис. 3. Схема образования наклепа и остаточных напряжений при шлифовании одиночным, жестко укрепленным абразивом [4]

В [1] сказано, что заточка на алмазном круге обеспечивает не только высокую производительность, но и существенное увеличение стойкости инструмента, благодаря остаточным напряжениям сжатия в поверхностном слое.

На кафедре «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета проводились эксперименты. Они определили эффективные способы заточки, которые создают определенные показатели качества в материале поверхностного слоя рабочей части инструмента. Это не только повышает стойкость, но и обеспечивает ее стабильность при дальнейших переточках (рис. 4) [5].

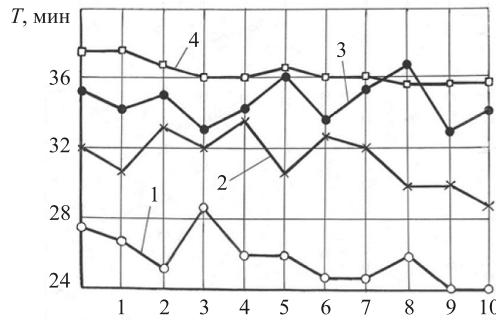


Рис. 4. Значения стойкости  $T$  сверл из быстрорежущей стали Р6М5 после заточек: абразивным кругом без охлаждения (кривая 1); алмазным кругом (кривая 2); электроалмазной заточкой (кривая 3); абразивным кругом, импрегнированным диоксидом хрома с подачей йодсодержащей охлаждающей жидкости (кривая 4). По горизонтальной оси — количество переточек [5]

Для построения графиков 1–4 отслеживали состояние сверл после первой заточки и работы в течение некоторого времени. С помощью микроскопа определяли износ рабочей поверхности. Если он оценивался как критический, инструмент перетачивали. На графике фиксировали время его работы до достижения этого предельного значения. Таким образом, стойкость  $T$  измеряется в минутах. Затем сверло затачивали второй раз и т. д. На горизонтальной оси рис. 4 показано количество таких переточек.

Согласно [3], в реальных условиях шлифования фиксируются одновременные деформации от сил резания и тепловых процессов. Следовательно, их нужно суммировать:

$$e_x^{\Sigma+стр} = \varepsilon_x^P + \varepsilon_x^T + \varepsilon_x^{стр}, e_y^{\Sigma+стр} = \varepsilon_y^P + \varepsilon_y^T + \varepsilon_y^{стр}, e_z^{\Sigma+стр} = \varepsilon_z^P + \varepsilon_z^T + \varepsilon_z^{стр}. \quad (1)$$

Здесь  $e_x^{\Sigma+стр}, e_y^{\Sigma+стр}, e_z^{\Sigma+стр}$  — суммарные деформации;  $\varepsilon_x^P, \varepsilon_y^P, \varepsilon_z^P$  — деформации от силового воздействия;  $\varepsilon_x^T, \varepsilon_y^T, \varepsilon_z^T$  — температурные деформации;  $\varepsilon_x^{стр}, \varepsilon_y^{стр}, \varepsilon_z^{стр}$  — структурные деформации.

Систему (1) можно использовать для анализа формирования технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя рабочей части инструмента при заточке.

Формирование микрогеометрии поверхностного слоя — сложный физико-механический процесс. Полученная шероховатость — это результат нанесения огромного числа микроцарапин. Она зависит от геометрических параметров и свойств зерна, степени пластического деформирования, удельной нагрузки круга на деталь, числа проходов круга по определенному участку и некоторых других условий. В [6] приводится схема создания единичным зерном абразивного круга профиля обрабатываемой поверхности (рис. 5). Ее можно использовать для изучения образования шероховатости при заточке рабочей части инструмента.

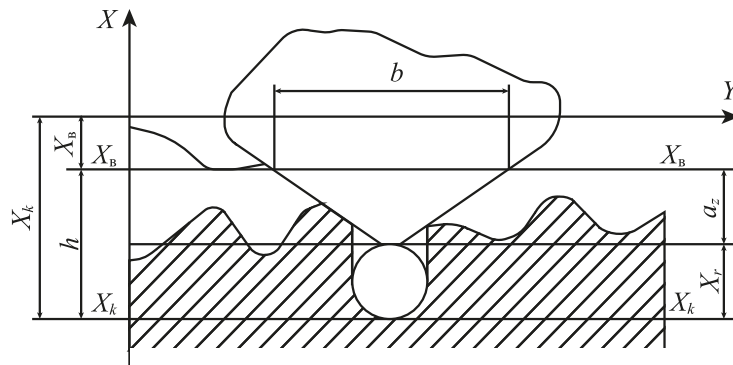


Рис. 5. Схема формирования зерном профиля поверхности детали в процессе абразивной обработки:  $X, Y$  — координатные оси;  $b$  — ширина канавки;  $X_k, X_r, X_a$  — уровни, определяющие положение впадин исходной поверхности;  $h$  — расстояние от уровня  $X_k$ ;  $a_z$  — глубина внедрения зерна в обрабатываемую поверхность [6]

Авторы [6], задействовав эту схему и теоретико-вероятностный подход, получили формулы для определения высотного параметра шероховатости  $Ra$  и среднего шага неровности  $S_m$ :

$$Ra = \frac{7,8s}{l} (1 - f_{mp}) \int_{r_{min}}^{r_{max}} f(r) dr \cdot N_0 \cdot \int_{-3\sigma_a}^{X_{cp}} (X_{cp} - h)^2 f(h) dh, \quad (2)$$

$$S_m = \frac{1}{s} \left[ N_0 (1 - f_{mp}) \int_{r_{min}}^{r_{max}} f(r) dr \right]^{-1} \left[ \int_{-3\sigma_a - 2r_{max}}^{X_{cp}} f(x) dx \right]^{-1}. \quad (3)$$

Здесь  $s$  — площадь контактной поверхности «заточной круг — инструмент»;  $N_0$  — количество зерен, одновременно участвующих в резании;  $f_{mp}$  — коэффициент трения в зоне обработки;  $f(h), f(r), f(x)$  — функции распределения;  $r_{min}, r_{max}$  — минимальный и максимальный радиус округления зерна.

Согласно экспериментальным данным, параметры шероховатости обработанной поверхности детали зависят в первую очередь от характеристики круга, условий его правки, режима шлифования, свойств обрабатываемого материала и смазочно-охлаждающих средств. Значительное влияние на шероховатость оказывает окружная скорость круга [4]:

$$Ra = \frac{C}{V_k^{0,75}},$$

где  $C$  и  $x$  — коэффициент и показатель степени, принимаемые в зависимости от способа заточки и свойств инструментального материала.

Формулы (2)–(4) рекомендуется использовать для контрольной проверки достижения заданных высотного параметра шероховатости  $Ra$  и среднего шага неровности  $S_m$  поверхности рабочей части инструмента при заточке, а также для корректировки режимов заточной операции.

**Заключение.** Итак, заточка создает определенную структуру, остаточные напряжения, стойкость и микротвердость материала поверхностного слоя рабочей части инструмента. Эти параметры зависят главным образом от тепловых процессов в зоне контакта заточного круга и обрабатываемой поверхности инструмента. В статье приводятся зависимости, полученные при изучении шлифования деталей. Эти данные можно использовать для исследования процессов затачивания. Отмечено, что одно из направлений повышения эффективности металлорежущих инструментов — разработка таких способов заточки, которые реализуются с меньшим коэффициентом трения в контактной зоне «заточной круг — инструмент» при более низких температуре и термо-ЭДС. Способы заточки металлорежущих инструментов сравниваются по изменению термо-ЭДС и стабильной стойкости инструмента при дальнейших переточках.

#### Список литературы

1. Рыжкин А.А. *Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке*. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2019. 289 с.
2. Праведников И.С. Влияние марки обрабатываемого материала и инструментальных сплавов на термо-ЭДС. *Нефтяное дело*. 2006;1. URL: <https://ogbus.ru/article/view/vliyanie-marki-obrabatyvaemyx-i-instrumentalnyx-splavov-na-ter> (дата обращения: 06.05.2024).
3. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. *Физические основы процесса шлифования*. Саратов: Изд-во Саратовского университета; 1978. 128 с.
4. Шальнов В.А. *Шлифование и полирование высокопрочных материалов*. Москва: Машиностроение; 1972. 272 с.
5. Бутенко В.И., Кадач Р.Г. Исследование эффективности способов заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали. В: *Сб. тр. науч.-тех. конф. «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов»*. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2023. С. 96–101. URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2023265> (дата обращения: 06.05.2024).
6. Королев А.В., Тюрин А.Н. Расчет прочности удержания абразивного зерна связкой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2008;3:100–109.

*Об авторах:*

**Роман Геннадьевич Кадач**, аспирант кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [rkad925@mail.ru](mailto:rkad925@mail.ru).

**Виктор Иванович Бутенко**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [butenkowiktor@yandex.ru](mailto:butenkowiktor@yandex.ru).

*Конфликт интересов:* авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*About the Authors:*

**Roman G. Kadach**, Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [rkad925@mail.ru](mailto:rkad925@mail.ru)

**Viktor I. Butenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [butenkowiktor@yandex.ru](mailto:butenkowiktor@yandex.ru)

*Conflict of interest statement:* the authors do not have any conflict of interest

*All authors have read and approved the final manuscript*