

UDC 621.634

## **Kostyuk I.A., Krasnova M.N. Types of Abrasive Wear When Grinding Hard-to-Machine Metals**

Виды износа абразивных материалов при шлифовании труднообрабатываемых  
металлов

**Kostyuk Ivan Aleksandrovich,**

master

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Voronezh State Technical University»

**Krasnova Marina Nikolaevna**

PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Voronezh State Technical University»

Костюк Иван Александрович,  
магистр

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Воронежский государственный технический университет»

Краснова Марина Николаевна

к. т. н, доцент кафедры технологии машиностроения Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский  
государственный технический университет»

***Abstract.** The paper presents studies of diffusion, chemical, adhesive, and mechanical processes occurring in the tool-workpiece contact zone during grinding.*

***Keywords:** abrasive grains, adhesive wear, titanium grinding, coolant, quality and accuracy characteristics.*

***Аннотация.** В работе представлены исследования диффузионных, химических, адгезионных и механических процессов, протекающих в зоне контакта инструмент-деталь при шлифовании.*

***Ключевые слова:** абразивные зерна, адгезионный износ, шлифование титана, СОЖ, качественно-точностные характеристики.*

---

**Рецензент:** Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Шлифование является одним из важнейших процессов в современном машиностроении, поскольку позволяет создавать детали с высокой точностью и безупречным качеством поверхности. Постоянное развитие технологий делает этот метод обработки всё более производительным и универсальным, что расширяет его применение для самых разных отраслей производства.

Как отмечает А.С. Янющкин, на долю шлифования приходится значительная часть всех операций механической обработки материалов [3]. Однако существенным недостатком этого процесса является интенсивное выделение тепла, которое может

негативно сказываться на качестве поверхностного слоя деталей. Чтобы решить эту проблему, ведутся активные научно-исследовательские работы по разным направлениям. Их цель – найти способы снижения тепловых нагрузок, что позволит расширить безопасные режимы резания, увеличить производительность труда и улучшить качество готовых изделий.

Сфера применения и разнообразие используемых металлов постоянно растут. Переходные металлы, благодаря своим уникальным свойствам, стали незаменимы в таких отраслях, как авиация, ракетостроение, космонавтика, энергетика, радиоэлектроника, химическая промышленность, машиностроение, металлургия, медицина и производство бытовой техники.

Однако, несмотря на широкое распространение, процессы их шлифования – финальной стадии обработки, определяющей окончательные свойства поверхности детали, – остаются недостаточно изученными. Этот пробел в знаниях серьёзно тормозит внедрение в производство новых конструкционных материалов.

Кроме того, важную роль в износе шлифовального инструмента играют химические реакции. Они активно протекают непосредственно в зоне контакта между абразивом, обрабатываемым материалом и окружающей средой. Риск возникновения таких реакций особенно велик при обработке химически активных металлов, к которым относится, например, титан. Это приводит к ускоренному разрушению инструмента и усложняет процесс обработки.

Теоретические положения базируются на научных положениях и законах физики, химии, химической термодинамики, физико-химической механики материалов, теории трения и износа материалов, теории резания. А.А. Волковский отмечает, что качество шлифованной поверхности оцениваются по результатам испытаний на долговечность специальных образцов и реальных деталей, остаточным напряжениям первого рода, микротвердости и шероховатости поверхности [1].

Изначально процесс шлифования металлов рассматривался исключительно как механическое воздействие. Исходя из этого подхода, при выборе абразивного инструмента руководствовались простым правилом: для обработки вязких (пластичных) металлов следует использовать более вязкие абразивные материалы, а для хрупких – соответственно, хрупкие. В рамках этой теории основными механизмами износа абразивных зёрен считались следующие: истирание (постепенное истирание вершины зерна, что приводило к образованию плоской площадки на его вершине и изменению шероховатости); расщепление (отделение от зерна небольших фрагментов); разрушение (откалывание крупных частиц, соизмеримых с размером самого зерна); вырывание (полное выпадение целого зерна из связки инструмента).

С появлением новых марок высоколегированных сталей, титановых, кобальтовых и молибденовых сплавов существующих представлений о механизме изнашивания стало недостаточно. На основании многочисленных исследований изнашивания абразивных материалов при микроцарапании и шлифовании различных металлов Т.Н. Лоладзе и Г.В. Бокучава выделяют три вида износа: адгезионно-усталостный, абразивный и диффузионный [2]. Адгезионный износ возникает из-за «схватывания» или прилипания материалов зерна и детали в точках контакта. При скольжении на поверхности зерна образуются и тут же срезаются так называемые адгезионные пятна. Многократное повторение этого процесса приводит к усталостному разрушению рабочей поверхности абразива. Это самый распространённый вид износа, интенсивность которого зависит от того, насколько сильно материалы сцепляются друг с другом и какую прочность имеют их контактные слои. Такой тип износа характерен, например, для шлифования титана кругами из карбида кремния и электрокорунда. Абразивный износ происходит, когда твёрдые частицы (включения) в обрабатываемом металле действуют как микрорезцы, царапая поверхность абразивного зерна. Интенсивность этого процесса напрямую связана с температурой: при нагреве твердость абразива падает. Поэтому на низких скоростях такой износ маловероятен, но с увеличением скорости резания температура абразива растёт быстрее, чем у металла. В результате твердость металлических включений может сравняться или даже превысить твердость затупившегося зерна, что и вызывает появление царапин на его задней поверхности. Диффузионный износ представляет собой процесс растворения материала абразивного зерна в обрабатываемом металле. Этот механизм активируется под воздействием трёх ключевых факторов: химического сродства между материалами, очень высоких температур в зоне резания и контакта чистых, ювенильных поверхностей.

Обработка титана и его сплавов шлифованием – сложная технологическая задача, обусловленная уникальными свойствами этого металла: низкой способностью проводить тепло, высокой вязкостью и сильной склонностью к налипанию. Для эффективного решения этой проблемы требуется комплексный подход.

Ключевые трудности при обработке:

- интенсивное тепловыделение: из-за высокого трения в зоне резания выделяется много тепла, которое плохо отводится от зоны обработки. Это приводит к катастрофически быстрому износу абразивного инструмента;

- повреждение поверхности: перегрев вызывает появление микротрещин и других дефектов в поверхностном слое детали;

- адгезионный износ: частицы титана легко налипают (привариваются) на рабочую поверхность инструмента, что снижает его эффективность и качество обработки.

Для успешного шлифования необходимо тщательно контролировать три основных аспекта: выбор абразивного инструмента (тип абразива должен соответствовать свойствам титана и требованиям к чистоте поверхности); режимы резания (к ним относятся скорость вращения круга, величина подачи и глубина съёма материала); система охлаждения (применение качественных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) является критически важным для интенсивного отвода тепла и предотвращения перегрева как детали, так и инструмента).

Достижение заданной шероховатости поверхности — важнейший этап финишной обработки, поскольку этот параметр напрямую влияет на долговечность изделия, прочность соединений и общие эксплуатационные характеристики материала. На формирование шероховатости при шлифовании влияют следующие основные факторы: (далее следует перечисление этих факторов).

Факторы, определяющие шероховатость:

1. Абразивный инструмент.

2. Зернистость круга (рис. 1). Чем мельче зерно абразивного инструмента, тем ниже шероховатость обработанной поверхности. Однако мелкое зерно увеличивает риск засаливания круга и снижает производительность процесса.



Рисунок 1. Зернистость круга

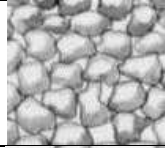

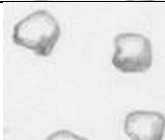
3. Связка. Прочность связки влияет на стойкость зерен, стабильность режущих кромок и, соответственно, на равномерность снятия материала.

4. Структура круга. Плотность расположения зерен также важна. Менее плотная структура позволяет лучше отводить стружку и охлаждать зону резания, снижая вероятность образования дефектов поверхности.

Структура абразивных инструментов, соотношение между объемами зерен и пор, представлена в таблице 1:

Таблица 1

Структура абразивных инструментов

Наименование	Внешний вид	Использование
Плотная		Для наружного круглого шлифования
Средняя		Для внутреннего круглого шлифования
Открытая		Для плоского шлифования и отрезания

Нормальный электрокорунд (Э) содержит 91 – 96% кристаллической окиси алюминия  $Al_2O_3$ ; выпускается пяти марок – Э5, Э4, Э3, Э2К, Э2 (в марке Э5 – 95%  $Al_2O_3$ , в марке Э4 – 94%]  $Al_2O_3$  и т.д.).

Белый электрокорунд (ЭБ) изготавливается из чистого глинозема и содержит 97-99%  $Al_2O_3$ . Имеет более высокие, чем электрокорунд Э, режущие свойства. Выпускается трех марок – Э9, Э9А и Э8, электрокорунд Э9А более качественен, чем Э9, и применяется для абразивного инструмента класса А. Электрокорунды Э и ЭБ применяют при обработке металлов и сплавов с высоким пределом прочности на разрыв (стали, ковкий чугун, мягкие бронзы).

Карбид кремния (карборунд) является химическим соединением кремния и углерода ( $SiC$ ). Он получается из кварцевого песка при сплавлении его с углеродом (коксовым порошком). При нагреве в электропечах до  $1920^\circ C$  кремнезем, содержащийся в кварцевом песке, вступает во взаимодействие с углеродом, образуя при этом карбид кремния. Карбид кремния имеет высокие твердость (уступая карбиду бора, алмазу и эльбору), теплоустойчивость (до  $2050^\circ C$ ) и режущие свойства. Последнее объясняется тем, что при дроблении карбида кремния образуются острые режущие кромки. Карбид кремния выпускается двух видов: черный КЧ и зеленый КЗ; черный карбид кремния – КЧ8 ( $SiC$  – 98%) и КЧ7, зеленый карбид кремния – КЗ9 ( $SiC$  – 98,5%) и КЗ8 ( $SiC$  – 98%).

Черный карбид кремния менее качественен, чем зеленый. Зеленый карбид кремния имеет несколько большую твердость ( $HV$  до  $3600 \text{ кгс/мм}^2$ ) и обеспечивает большую производительность (что объясняется его более острыми режущими кромками). При его изготовлении применяется чистый кварцевый песок (с содержанием

кремния выше 99%), более чистый углерод и затрачивается значительно больше электроэнергии; зеленый карбид кремния дороже черного. Карбид кремния хрупок. Поэтому его применяют при обработке материалов с малым пределом прочности на разрыв (чугуна, бронзовых и алюминиевых отливок, твердых сплавов и др.), причем зеленый карбид кремния используют в основном при заточке инструмента, оснащенного твердым сплавом. Карбид кремния применяют также и для безалмазной правки шлифовальных кругов после их затупления в процессе шлифования.

Карбид бора ( $B_4C$ ) является химическим соединением бора с углеродом. Он обладает большой твердостью, приближающейся к самому твердому материалу – алмазу, но хрупок. Карбид бора применяют для доводки твердых сплавов, при притирочных работах, требующих применения режущего инструмента высокой твердости.

Для того чтобы скрепить отдельные абразивные зёрна в единый инструмент, используются специальные связующие вещества, или связки. Именно от их качества зависит, насколько прочно зерно держится в круге и какую общую прочность имеет сам шлифовальный круг, ведь при вращении на него действуют огромные центробежные силы.

Все связки делятся на две большие группы: органические и неорганические. К органическим относятся вулканитовая (В), бакелитовая (Б) и глифталевая (ГФ). Вулканитовая связка (существуют маркировки В1, В2, В3) состоит из каучука (резины) и серы (около 30%). Её получают путём смешивания размягчённой в бензине резины с порошком серы. Инструмент на такой основе отличается высокой прочностью, эластичностью и влагостойкостью. Благодаря сочетанию прочности и гибкости можно изготавливать очень тонкие инструменты – толщиной всего 0,5 мм при диаметре до 150 мм, что критически важно для некоторых видов работ. Кроме того, такие круги выдерживают высокие окружные скорости вращения (до 75 м/с) и обеспечивают отличное качество полировки поверхности. Главным недостатком вулканитовой связки является её склонность к быстрому засаливанию, когда поры инструмента забиваются металлической пылью и частицами абразива, что со временем снижает его режущую способность и производительность.

Бакелитовая связка (Б1, Б2), изготовленная из искусственной смолы (бакелита), получаемой из карболовой кислоты и формалина, придаёт шлифовальным кругам прочность, эластичность и позволяет работать на высоких скоростях вращения. Однако у неё есть существенный недостаток: она разрушается под воздействием щелочных охлаждающих жидкостей. Чтобы этого избежать, инструмент рекомендуется пропитывать парафином. Кроме того, бакелит теряет свою прочность при нагреве свыше 180 °С. Для

достижения более гладкой, менее шероховатой поверхности в состав такой связки иногда добавляют графитовый наполнитель.

Глифталевая связка, представляющая собой синтетическую смолу из глицерина и фталевого ангидрида, используется для производства инструмента, предназначенного для финишных операций – доводки и полировки.

К неорганическим связкам относятся керамическая (К), магнизиальная (М) и силикатная (С). Самой распространённой является керамическая связка (КО, К1, К3). Её изготавливают из огнеупорной глины, полевого шпата, кварца, а также талька, мела и жидкого стекла. Этот тип связки обладает высокой огнеупорностью и химической стойкостью. Инструменты на её основе отличаются большой производительностью, хорошо сохраняют форму рабочей кромки и не боятся влаги. Главным недостатком керамической связки является её хрупкость, из-за чего инструменты чувствительны к ударам и могут разрушаться при падении или неравномерной нагрузке.

Высокая скорость обеспечивает лучшее снятие металла, однако требует повышенного внимания к качеству охлаждения и стабильности процесса.

Применение смазочно-охлаждающих технологических средств является одним из важнейших факторов, позволяющих резко повысить эффективность шлифования. Путем совершенствования составов, технологий и техники применения СОТС можно существенно увеличить наработку абразивного инструмента, обеспечить требуемое качество шлифованных поверхностей деталей за более короткое время.

Расход смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании зависит от окружной скорости шлифовального круга и косвенно от зернистости. Это означает, что с увеличением скорости круга полезный расход СОЖ возрастает, так как повышается поток жидкости, проходящий в минимальный зазор между кругом и заготовкой (рис. 2).

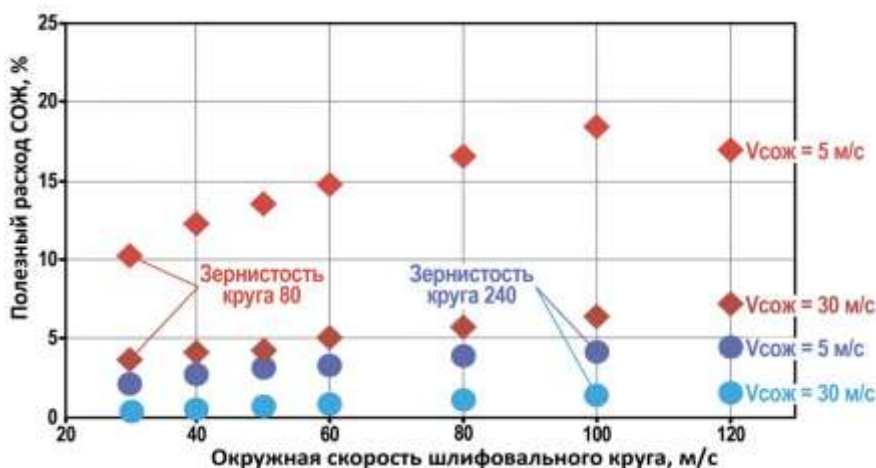


Рисунок 2. Зависимость полезного расхода СОЖ от окружной скорости шлифовального круга

Экспериментальные исследования показывают нелинейную зависимость температуры в шлифовальной дуге от расхода СОЖ. Можно выделить три основных диапазона: низкий (менее 20 л/мин), оптимальный (20-32 л/мин) и избыточный расход (32-40 л/мин) (рис. 3).

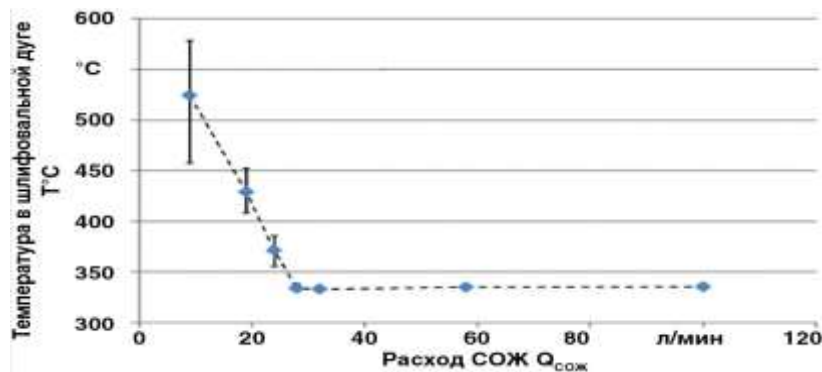


Рисунок 3. Зависимость температуры в шлифовальной дуге в зависимости от расхода СОЖ

Избыточное давление может привести к деформации детали, образованию прижогов и увеличению высоты микронеровностей.

Шероховатость определяется комплексом факторов, включая режимы шлифования и время обработки, оно может хоть и косвенно влиять через накопление износа инструмента, изменение температуры в зоне обработки и другие динамические процессы (рис. 4).

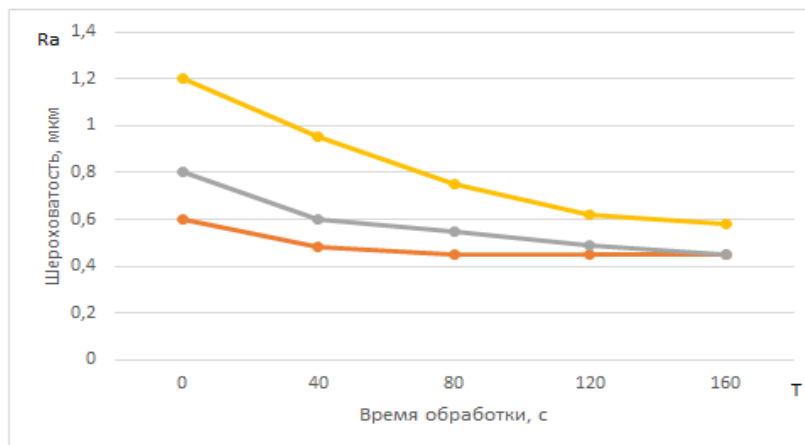


Рисунок 4. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки при различной исходной шероховатости

Применение контрольно-измерительных приборов, таких как профилометры, образцы шероховатости и щуповые датчики, для определения параметров шероховатости поверхности.

В связи с тем, что при увеличении глубины резания увеличивается объём снимаемого материала, усиливается трение и теплообразование (рис. 5). Таким образом, обеспечение необходимой шероховатости достигается комплексным подходом, включающим правильный выбор инструмента, оптимизацию времени и режима обработки, контроль температуры и учет особенностей материала заготовки.

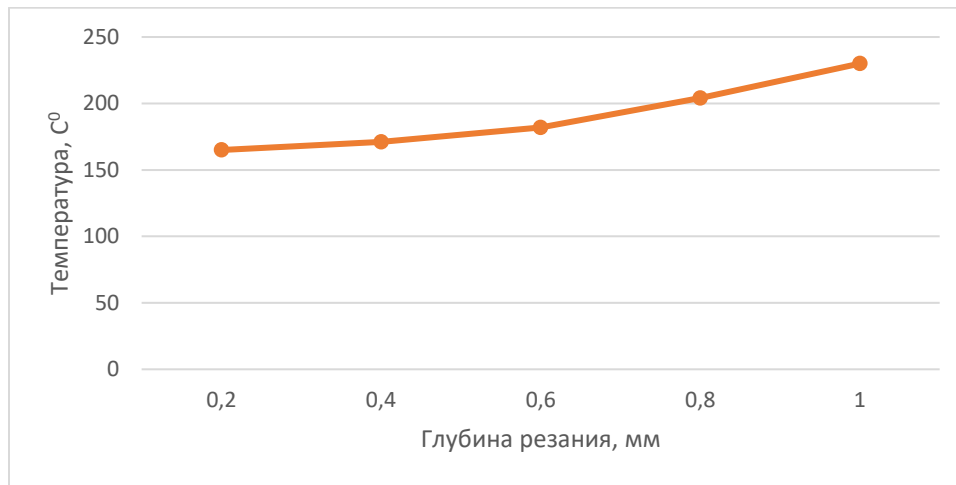


Рисунок 5. Зависимость температуры от глубины резания

Обеспечение качественных и точностных характеристик изделий при шлифовании включает комплекс мероприятий, направленных на достижение требуемого уровня точности размеров, формы и качества поверхности деталей.

Необходимо минимизировать возникновение дефектов обработки, таких как: шероховатость поверхности, задиры и царапины, деформации и напряжения в материале.

Рекомендации по повышению качества обработки.

Регулярная правка кругов для поддержания остроты режущих кромок.

Оптимизация режимов резания согласно характеристикам материала и требованиям чертежа.

Периодический контроль состояния оборудования и инструментов.

Таким образом, обеспечение высококачественных результатов при шлифовании требует комплексного подхода, включающего грамотный выбор инструмента, оптимизацию условий обработки и применение передовых методов контроля и диагностики.

## References

1. Волковский А.А. Оценка качества обработанной поверхности при плоском шлифовании ПКМ / А.А. Волковский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2023. – № 1. – С. 73-82.
2. Лоладзе, Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе. – Москва: Машиностроение, 1967. – 112 с.
3. Янюшкин А.С. Технология шлифования композиционных материалов / А.С. Янюшкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – № 1. – С. 449-451.