

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.9.079

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185680>

EDN: <https://www.elibrary.ru/MXCMFL>



Повышение эффективности лезвийной обработки труднообрабатываемых сплавов путем применения инновационных смазочно-охлаждающих технологических средств

Марс Шарифуллович Мигранов¹✉, Александр Сергеевич Метель², Денис Сергеевич Репин³,
Андрей Сергеевич Гусев⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва,
Российская Федерация

¹ migmars@mail.ru ✉

Аннотация. Представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований эффективности применения инновационных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) с различными кислородсодержащими полимерными присадками, подвергающихся последующему термоактивационному воздействию при лезвийной обработке резанием труднообрабатываемых материалов (жаропрочных, нержавеющей хромоникелевых и титановых сплавов), используемых в ответственных деталях современных механизмов и машин авиационной техники. Проведены серии износостойких, температурно-силовых испытаний при продольном точении и сверлении в широком диапазоне изменения элементов режима резания. Для реализации натурных испытаний разработаны оригинальные конструкции станочных приспособлений и средств контроля основных показателей эффективности лезвийной обработки резанием. По результатам проведенных экспериментальных исследований подтверждено повышение эффективности лезвийной обработки труднообрабатываемых сплавов при применении разработанных и внедренных в производство смазочно-охлаждающих технологических средств.

Ключевые слова: эффективность обработки ответственных деталей агрегатов и узлов авиационных силовых установок, инновационные смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) с кислородсодержащими полимерными присадками, термоактивационное воздействие ионизатор-озонатора на СОТС, точение и сверление жаропрочных хромоникелевых и титановых сплавов, износостойкость режущего инструмента, температура резания при продольном точении, крутящий момент при сверлении

Финансирование: исследование выполнено за счет средств государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFS-2023-0003).

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Метель А.С., Репин Д.С., Гусев А.С. Повышение эффективности лезвийной обработки труднообрабатываемых сплавов путем применения инновационных смазочно-охлаждающих технологических средств // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 3. С. 198–207. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185680>

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Edge-Tool Machining Efficiency Upgrading of the Hard-to-Machine Alloys by the Innovative Lubricating-and-Cooling Technological Means Application

Mars Sh. Migranov^{1✉}, Aleksandr S. Metel'², Denis S. Repin³, Andrei S. Gusev⁴

^{1, 2, 3, 4} Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russian Federation

¹ migmars@mail.ru[✉]

Abstract

The growing need for domestic mechanical engineering and aircraft engine manufacturing continuous development is being followed by the development and introduction into industry of the new brands of machined and tool materials with unique physical and mechanical properties and employed at high temperatures and under alternating loads. The required strength characteristics increasing herewith of the processed material for the critical parts of modern aircraft engines subjected to the edge-tool cutting leads to significant productivity degradation and its effectiveness as a whole, as well as increased consumption of the cost intensive carbide and tungsten-containing metal cutting tool. It is well-known therewith that the machine building industry progress depends for the most part on the volume and number of science-intensive developments for creating high-tech methods for the prospective aviation materials processing with innovative lubricating-and-cooling technological means (LCTM) application and subsequent capability of their effectiveness increasing by various physicotchnical means of their activation. The article presents the results of theoretical-and-experimental studies of the developed innovative lubricating-and-cooling technological means with various oxygen-containing polymer additives, subsequently thermally activated while edge-tool cutting difficult-to-machine materials, such as heat-resistant, stainless chromium-nickel and titanium alloys, employed for critical parts of modern mechanisms and machines in aviation technology with the purpose of their operational functions efficiency improving. A series of wear resistance, temperature, and strength tests were performed herewith while longitudinal turning and drilling in a wide range of cutting conditions. Original designs of machine tools and means for controlling the main efficiency indicators of the blade cutting were developed to conduct full-scale experimental tests. The cutting tools wear resistance improvement was confirmed by the results of studying application specifics of the lubricating-and-cooling technological means with the state-of-the-art innovative oxygen-containing polymer additives while the edge-tool cutting. It allowed ensuring the productivity increasing with quality indicators improving of the machined surface while the heat-resistant alloys lathing and drilling by the machinability. A positive effect of the use of oxygen-containing polymer additives on the basic machinability indicators when drilling difficult-to-machine metals has been established, with average torque reduction by 35%, as a parameter determining the cutting tools wear resistance and an average roughness reduction of the machined surface by 10%. All obtained results demonstrate a high degree of correlation between each other and the properties of the additives used.

In general, based on the results of the research, the optimal compositions of LCTMs with oxygen-containing polymer additives and their rational modes of application have been determined and proposed. The widespread industrial application of these lubricating-and-cooling technological means in leading aviation enterprises will significantly increase the edge-tool cutting productivity of the difficult-to-machine materials, as well as significantly improve the machined surface quality compared to the traditionally applied basic LCTs, while ensuring improved sanitary and hygienic standards in the work zone of an enterprise.

Keywords: efficiency of critical parts of the aircraft power plants assemblies and units processing, innovative lubricating and cooling technological means (LCTM) with oxygen-containing polymer additives, thermo-activation effect of ionizer-ozonizer on the LCTM, lathing and drilling heat-resistant chromium-nickel and titanium alloys, cutting tools wear resistance, cutting temperature at longitudinal turning, drilling torque

Financing: the study was financed by the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSFS-2023-0003).

For citation: Migranov M.Sh., Metel' A.S., Repin D.S., Gusev A.S. Edge-Tool Machining Efficiency Upgrading of the Hard-to-Machine Alloys by the Innovative Lubricating-and-Cooling Technological Means Application. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(3):198-207. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185680>

List of Figures

- Fig. 1. Schematic diagram of the unit application during longitudinal turning. (1 – control panel; 2 – cutter; 3 – ionizer-ozonator; 4 – machined workpiece)
- Fig. 2. Schematic diagram of the unit application while drilling: (1 – control panel; 2 – drill bit; 3 – ionizer-ozonator; 4 – workpiece)
- Fig. 3. Schematic diagram of the attachment (installation): 1 – tool; 2 – workpiece; 3 – workpiece clamp; 4 – movable table; 5 – compensating mechanism; 6 – stationary table; 7 – sensor adjustment mechanism; 8 – sensor
- Fig. 4. The cutting speed impact on the cutting path length during turning “15H18N12C4TYu–VK10 EFG”
($S = 0.11$ mm/rev; $t = 0.5$ mm)
- Fig. 5. Dependence of the relative linear wear on the turning speed of “15H18N12C4TYu–VK10 EFG”
($S = 0.11$ mm/rev; $t = 0.5$ mm)
- Fig. 6. Temperature dependence in the cutting zone on the machining speed of the “15H18N12C4TYu–VK10 EFG”
($S = 0.11$ mm/rev; $t = 0.5$ mm)
- Fig. 7. Effect of cutting speed on cutting path length when turning “07H16N6–VK10 EFG”
($S = 0.11$ mm/rev; $t = 0.5$ mm)
- Fig. 8. Dependence of relative linear wear on the turning speed of the “07H16N6–VK10 EFG”
($S = 0.11$ mm/rev; $t = 0.5$ mm)
- Fig. 9. Temperature dependence in the cutting zone on the machining speed of the “07H16N6–VK10 EFG”
($S = 0.11$ mm/rev; $t = 0.5$ mm)
- Fig. 10. The LCTM grade effect on the torque while drilling “15H18N12C4TYu–VK10 EFG”
($d = 12$ mm; $n = 650$ rpm; $S = 0.07$ mm/rev)
- Fig. 11. The LCTM grade effect on the machined surface roughness when drilling “15H18N12C4TYu–VK10 EFG”
($d = 12$ mm; $n = 650$ r/min; $S = 0.07$ mm/rev)
- Fig. 12. The LCTM grade impact on the torque at drilling “15H18N12C4TYu–VK10 EFG”
($d = 12$ mm; $n = 870$ r/min; $S = 0.09$ mm/rev)
- Fig. 13. The LCTM grade effect on the machined surface roughness when drilling “15H18N12C4TYu–VK10 EFG”
($d = 12$ mm; $n = 870$ rpm; $S = 0.09$ mm/rev)

Введение

В современном машиностроительном производстве, в частности в авиадвигателестроении, одним из наиболее эффективных методов повышения производительности механической обработки материалов и улучшения показателей качества обработанной поверхности с минимальными затратами является разработка и внедрение в технологический процесс доступного и экономически обоснованного способа – применения инновационных высокопроизводительных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Анализ опыта применения СОТС на большинстве передовых предприятий аэрокосмической отрасли позволил установить, что их рациональное использование дает возможность увеличить период стойкости инструмента в среднем от 1,5 до 4 раз; увеличить скорость резания на 30–55%; увеличить эффективность (производительность) обработки от 20 до 55% с обеспечением высоких показателей по качеству обработанных поверхностей детали при значительном снижении энергозатрат и сокращении других ресурсов на операциях лезвийной обработки резанием. При этом актуальным явля-

ется повышение производительности обработки резанием ответственных деталей агрегатов и узлов современных авиационных силовых установок, изготавливаемых из хромоникелевого и титанового сплавов. Необходимо также учитывать особенности обработки тугоплавких сталей и сплавов с повышенными показателями по жаропрочности, жаростойкости и коррозионностойкости. При обработке вышеуказанных деталей применяется современное высокопроизводительное оборудование (станки), оснащенное дорогостоящими системами автоматизированного (АСУ) и адаптивного (АдСУ) управления, а также высокопроизводительные мехатронные модули. Благодаря использованию современных инновационных СОТС улучшаются санитарно-гигиенические условия труда и микроклимат в рабочей зоне механообрабатывающего участка. В авиакосмической промышленности для лезвийной обработки резанием используется больше 80 разновидностей смазочно-охлаждающих технологических средств с массовым и специальным функционалом применения, соответствующих мировым стандартам по качеству и являющихся основой необходимого ассортиментного списка

[1–5]. При обилии современных высокоэффективных СОТС по-прежнему актуален вопрос их рационального выбора, разработки и внедрения в производственный процесс на основе глубокого анализа физико-химических явлений в зоне резания при высоких температурно-силовых нагрузках и специфических контактных явлениях пары «режущий инструмент — обрабатываемая деталь» в условиях лезвийной обработки металлов резанием. Требуется тщательный анализ механизмов влияния СОТС на износостойкость инструмента, на показатели качества обработанной поверхности (шероховатость, наклеп, остаточные напряжения первого и второго рода) и в целом эффективности их применения, что особенно важно в отношении ответственных деталей современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), подвергающихся значительным температурно-силовым нагрузкам при эксплуатации, в том числе высокочастотным вибрациям, из-за возможности «помпажа» или «зуда» при критических режимах работы. Вместе с тем следует отметить, что при выборе и оценке марки СОТС в большинстве случаев основной акцент делается на результаты экспериментальных исследований влияния смазочного материала на физико-механические и технологические параметры процесса обработки, без учета особенностей контактных процессов и возможности применения различных дополнительных активационных воздействий на смазочно-охлаждающую среду. Целью данной работы является исследование возможности повышения эффективности лезвийной обработки труднообрабатываемых материалов путем применения инновационных СОТС и дополнительной активации их электрофизическими методами в процессе резания.

Теоретико-экспериментальные предпосылки

В условиях значительной интенсификации процесса обработки резанием, внедрения и применения высокоскоростного металлообрабатывающего оборудования с уникальными мехатронными системами, укомплектованного инновационными металлорежущими инструментами для обеспечения высоких показателей качества обработанной поверхности ответственных деталей ГТД (в отношении шероховатости, микротвердости, остаточных напряжений и т. д.), необходима разработка эффективных СОТС, с возможностью улучшения их эксплуатационных свойств путем дополнительных воздействий для активационных и модифицирующих процессов [3–6]. Различные виды присадок не только оказывают благоприятное воздействие на температурно-силовые, контактные процессы в зоне резания, но и благодаря глубокому и

многостороннему взаимодействию на микро- и наноуровне с поверхностями обрабатываемого материала и режущего клина инструмента способствуют повышению износостойкости и улучшению показателей качества обработанной поверхности детали. В работах [7–12] установлено, что эффективность применения существующих смазочных материалов можно повысить, используя в качестве иницирующих элементов полимерные присадки. В то же время применение известных физических методов активации СОТС, в том числе с помощью полимерных присадок, может оказывать синергетический эффект на процесс механической обработки резанием тяжело нагруженных деталей силовой части ГТД, что проявляется в повышении износостойкости режущего инструмента, улучшении качества обработанной поверхности и т. д. Работоспособность инструмента может также снижаться в результате усталостного разрушения (образования трещин и сколов), скругления режущих кромок и пластической деформации режущего клина. Причем все вышеуказанные виды износа характерны и для обычных трибосопряжений. Согласно [3, 7, 12], идеально чистая ювенильная поверхность проявляет высокую реакционную способность и выступает в роли катализаторов химических реакций. В частности, значительно снижается температура термического разложения молекул СОТС, а также образуются продукты циклизации и полимеризации при разложении технологических средств на поверхностях металла. Согласно многочисленным исследованиям [13–21], в настоящее время значительный интерес вызывает комбинированное воздействие (применение СОТС, износостойких покрытий, физико-технических воздействий), обеспечивающее синергетический эффект.

Материалы, оборудование и технология экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований на предварительном этапе для сравнительной оценки эффективности воздействия смазочно-охлаждающих технологических средств на износостойкостные характеристики режущего инструмента при точении и сверлении было выбрано более пятнадцати широко используемых СОТС, а для дальнейших испытаний отдельно выделены как традиционно используемые (СОТС 5 — Эфтол и СОТС 6 — Эмульсол Т), так и разрабатываемые марки (СОТС 1 — Эфтол + ПВС (поливиниловый спирт); СОТС 2 — Эфтол + ПЭГ (полиэтиленгликоль); СОТС 3 — Эмульсол Т + ПВС; СОТС 4 — Эмульсол Т + ПЭГ). На экспериментальные инструментальные пластины для точения и на сверла для обработки отверстий из вольфрамоко-

бальтового твердого сплава марки ВК10 ОМ были нанесены износостойкие покрытия высокоэнтропийными катодами-мишенями из композиции ($\text{Al}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{15}\text{V}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Nb}_{15}$).

Экспериментальные испытания проводились при продольном точении на токарно-винторезном станке 16К20 и при сверлении на вертикально-сверлильном станке 2Р135Ф2. Принципиальные схемы применения разработанной установки для ионизационно-охлаждающего воздействия на применяемую смазочную жидкость при точении и сверлении представлены на рис. 1 и 2.

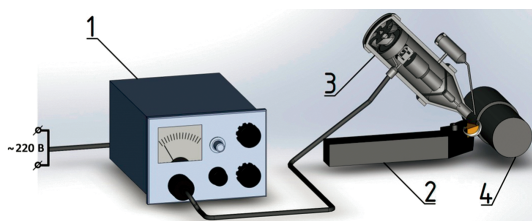


Рис.1. Принципиальная схема применения установки при продольном точении:

- 1 – панель управления; 2 – резец;
- 3 – ионизатор–озонатор;
- 4 – обрабатываемая заготовка

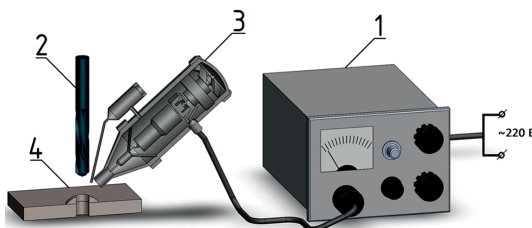


Рис. 2. Принципиальная схема применения установки для сверления:

- 1 – панель управления; 2 – сверло;
- 3 – ионизатор–озонатор;
- 4 – обрабатываемая заготовка

Комплексное ионизационно-охлаждающее воздействие на смазочную жидкость электрических разрядов от сетевого электрического питания с напряжением в 220 В осуществляется посредством соплового аппарата с разрядной иглой. Коронный разряд с различными знаками (плюс или минус), при исключении дополнительного нагнетательного устройства, генерируется путем изменения полярности от отрицательной к положительной и обратно. При этом обеспечивается возможность регулирования коронного напряжения в диапазоне 0–17 кВ с изменением давления сжатого воздуха (ионизированный поток) в пределах 0–0,5 МПа при ограничении тока заряженной частицы значением 100 мкА. Смена полярности осуществляется

простым разворотом умножителя напряжения, а для перехода на барьерный разряд необходимо заменить умножитель кольцевидной ячейкой.

Устройство включает в себя несколько ключевых компонентов, обеспечивающих его эффективность в технологических процессах, в частности оно оснащено соплом, которое представляет собой инжектор, предназначенный для микродозированной подачи различных СОТС в зону резания. Кроме того, установка включает блок формирования высокого напряжения, который необходим для ионизации и генерации озона, что может дополнительно улучшать свойства СОТС. Для охлаждения нагреваемых элементов установки (компонентов электрической части) используется дополнительный регулируемый воздушный насос различного конструктивного исполнения, в частности мембранного, плунжерного, роторного или центробежного типа, что позволяет адаптировать установку к конкретным условиям эксплуатации и требованиям производственного процесса.

Устройство для изучения внешнего энергетического воздействия на СОТС при резании закреплено на резцедержателе вместе с режущим инструментом с синхронизацией их движения при рабочем ходе. Для обеспечения эффективного охвата зоны воздействия установки предусмотрена возможность изменения положения торца соплового аппарата относительно режущего клина инструмента, оно может варьироваться в диапазоне 25–70 мм в зависимости от конкретных условий обработки, таких как конструкция станка, его приспособления, форма обрабатываемой детали, вид сходящей стружки и др.

Для исследования влияния СОТС при сверлении была использована приставка для измерения крутящего момента [6] (рис. 3). Принцип действия приставки (установки) заключается в следующем: при врезании сверла 1 в заготовку 2 поворачивается подвижный стол 4, закрепленный на валу, на одном конце которого находится конус. При действии силы между телами исследуемый образец вызывает вращение подвижного стола, который соединен с компенсационным механизмом 5, образуя в последнем момент. Как только момент компенсационного механизма уравнивает силу резания, поворотный столик останавливается. Сила резания оценивается по величине поворота столика. Для измерения силы резания в установке был использован датчик линейных перемещений (ДЛП) 8, работающий на основе принципа дифференциального трансформатора. Этот тип датчиков находит широкое применение в различных областях, таких как мехатроника и автоматизация.

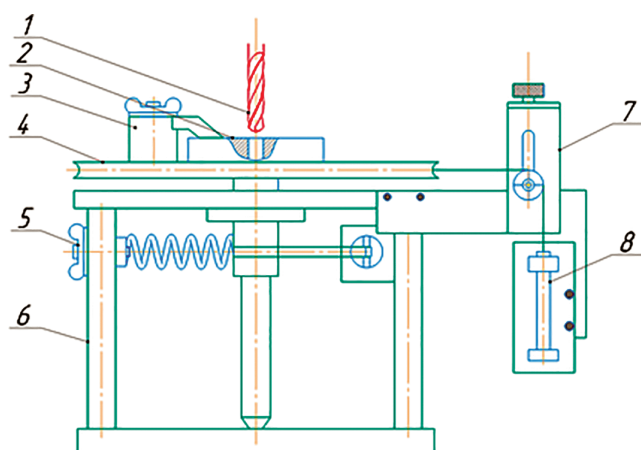


Рис. 3. Принципиальная схема приставки (установки):
1 – инструмент; 2 – заготовка;
3 – зажим заготовки; 4 – стол подвижный;
5 – механизм компенсационный;
6 – стол неподвижный;
7 – механизм регулирования датчика; 8 – датчик

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Для подтверждения выдвинутых гипотез были проведены серии экспериментальных испытаний на износостойкость режущего инструмента и температуры резания при продольном точении и сверлении жаростойких сталей и сплавов 15X18H12C4ТЮ, 07X16H6 твердосплавным инструментом ВК10 ОМ с износостойким покрытием ($\text{Al}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{15}\text{V}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Nb}_{15}$) (рис. 4–10).

В качестве показателей эффективности исследуемых СОТС с различными полимерными присадками (ПВС (поливиниловый спирт) и ПЭГ (полиэтиленгликоль)) при точении были выбраны: критическая длина пути резания ($l_{кр}$, м) – длина пути резания, соответствующая величине износа режущего клина инструмента по задней поверхности для условий получистового и чистового точения ($h_{зад} = 0,3$ мм); относительный линейный износ режущего инструмента ($h_{ол}$, мм/м) и температура резания (Θ , °С). При сверлении выбраны: величина крутящего момента ($M_{кр}$, Н·м); шероховатость обработанной поверхности при точении и сверлении (R_a , мм). Комплексный подход к исследованию этих показателей позволяет более полно оценить эффективность применения полимерных присадок в СОТС и их влияние на процесс обработки материалов.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что зависимость длины пути резания от скорости для всех испытуемых материалов носит экстремальный характер с максимумом при определенных скоростях резания; наилучшими триботехническими характеристиками (длина пути

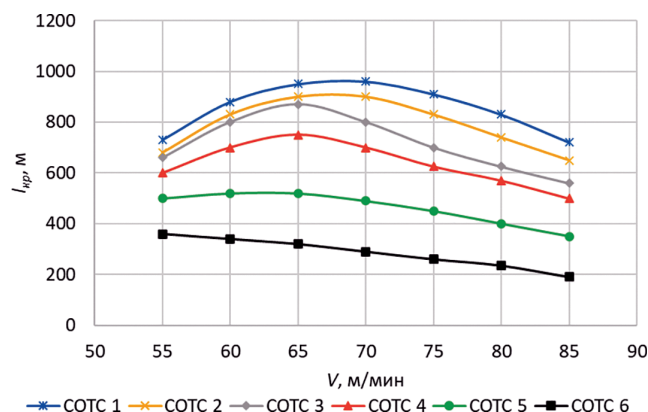


Рис. 4. Влияние скорости резания на длину пути резания при точении «15X18H12C4ТЮ–ВК10 ОМ» ($S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

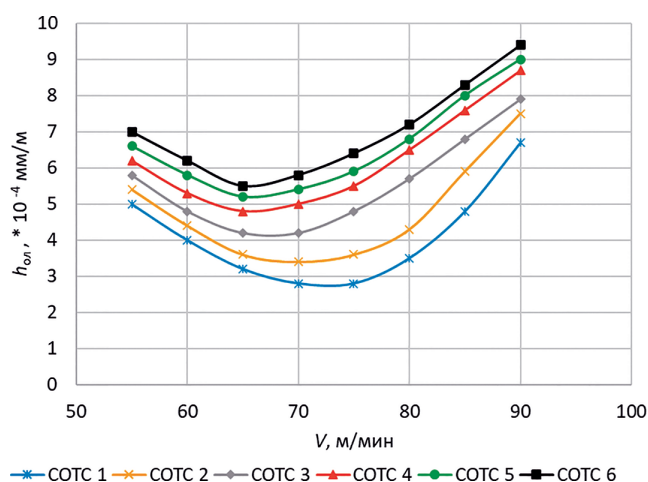


Рис. 5. Зависимость относительного линейного износа от скорости точения «15X18H12C4ТЮ–ВК10 ОМ» ($S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

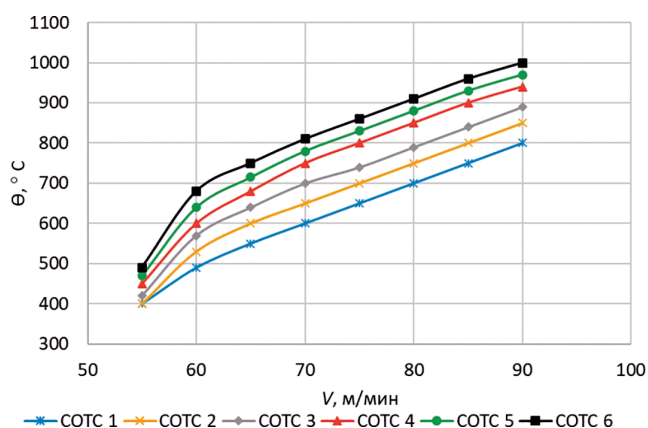


Рис. 6. Зависимость температуры в зоне резания от скорости обработки «15X18H12C4ТЮ–ВК10 ОМ» ($S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

резания, относительный линейный износ) обладают смазочно-охлаждающие технологические средства СОТС 1 и СОТС 2 при больших скоростях резания; зависимость температуры резания от скорости носит монотонно возрастающий характер. При этом наименьшее значение средней температуры резания обеспечивается при использовании смазочно-охлаждающих технологических средств

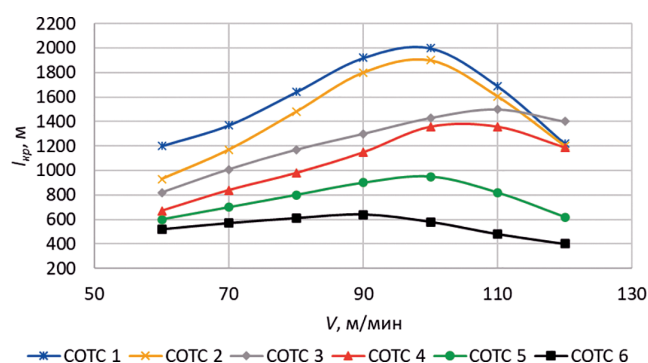


Рис. 7. Влияние скорости резания на длину пути резания при точении «07X16H6–BK10 OM» ($S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

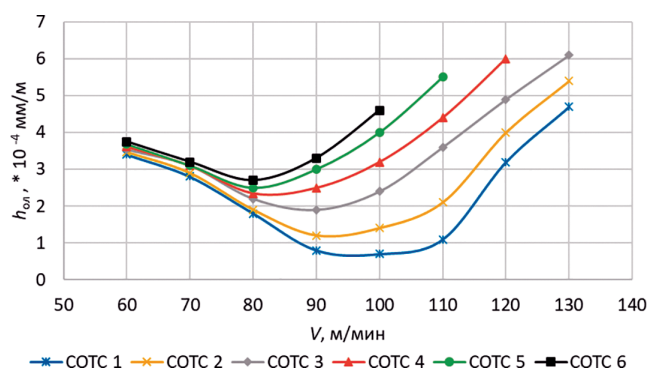


Рис. 8. Зависимость относительного линейного износа от скорости точения «07X16H6–BK10 OM» ($S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

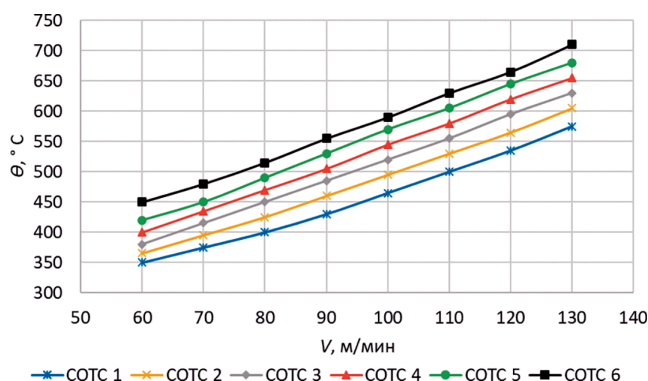


Рис. 9. Зависимость температуры в зоне резания от скорости обработки «07X16H6–BK10 OM» ($S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

СОТС 1 и СОТС 2; зависимость относительного линейного износа режущего инструмента от скорости резания имеет экстремальный характер с минимумом при более высоких значениях скорости резания для смазочно-охлаждающих технологических средств СОТС 1 и СОТС 2. В целом, их применение позволит повысить производительность механической обработки труднообрабатываемых материалов в широком диапазоне изменения элементов режима резания в среднем на 15–20% в зависимости от используемых кислородсодержащих полимерных присадок ПВС (поливиниловый спирт) или ПЭГ (полиэтиленгликоль).

По результатам экспериментальных исследований при сверлении сплавов 15X18H12C4ТЮ и 07X16H6 твердосплавными сверлами диаметром 12 мм установлено, что добавление кислородсодержащих полимерных присадок, в частности ПЭГ и ПВС, позволяет уменьшить крутящий момент (рис. 10, 12) в среднем на 35% и снизить шероховатость обработанной поверхности (рис. 11, 13) в

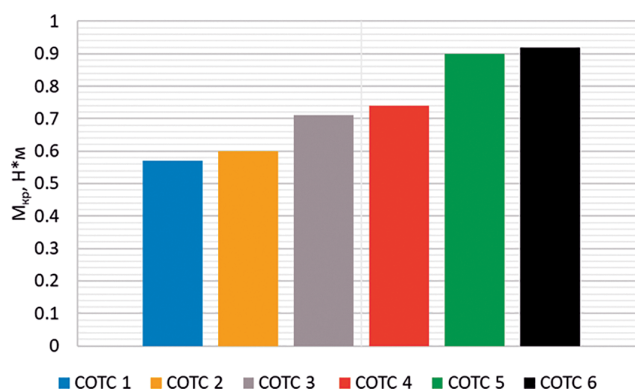


Рис. 10. Влияние марки СОТС на крутящий момент при сверлении «15X18H12C4ТЮ–BK10 OM» ($d = 12$ мм; $n = 650$ об/мин; $S = 0,07$ мм/об)

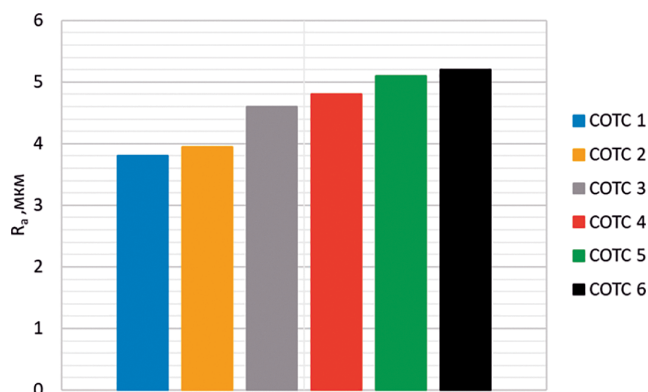


Рис. 11. Влияние марки СОТС на шероховатость обработанной поверхности при сверлении «15X18H12C4ТЮ–BK10 OM» ($d = 12$ мм; $n = 650$ об/мин; $S = 0,07$ мм/об)

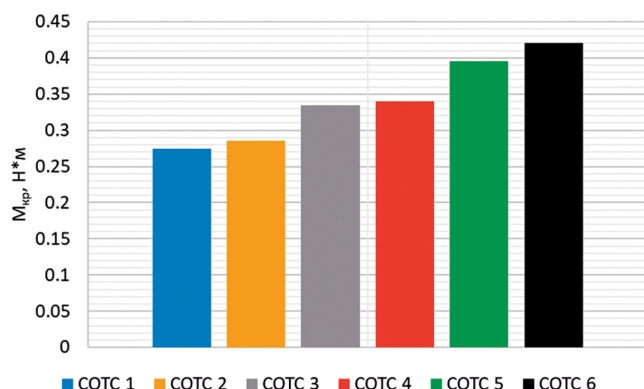


Рис. 12. Влияние марки СОТС на крутящий момент при сверлении «07X16H6–BK10 OM» ($d = 12$ мм; $n = 870$ об/мин; $S = 0,09$ мм/об)

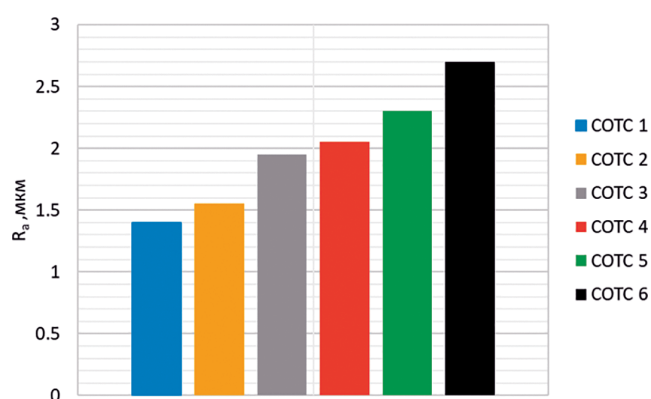


Рис. 13. Влияние марки СОТС на шероховатость обработанной поверхности при сверлении «07X16H6–BK10 OM» ($d = 12$ мм; $n = 870$ об/мин; $S = 0,09$ мм/об)

среднем на 10%. Эти данные свидетельствуют о том, что кислородсодержащие полимерные присадки оказывают положительное влияние на эксплуатационные характеристики СОТС, обусловленное их способностью к снижению трения в зоне резания во время обработки при воздействии коронного напряжения с изменением давления сжатого воздуха (ионизированный поток).

Выводы

По результатам исследования особенностей применения смазочно-охлаждающих технологических средств с современными инновационными кислородсодержащими полимерными присадками при лезвийной обработке резанием экспериментально подтверждено повышение износостойкости режущего инструмента, что позволило увеличить производительность при улучшении показателей качества обработанной поверхности при точении и сверлении жаропрочных сплавов. Результаты натурных экспериментальных испытаний подтвердили эффективность применения разрабатываемых

СОТС для лезвийной обработки резанием: увеличение периода стойкости режущего инструмента и улучшение показателей качества обработанной поверхности (снижение шероховатости) в широком диапазоне изменения элементов режима резания при применении активированных СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками, в частности увеличение периода стойкости инструментов на 15–20% при точении труднообрабатываемых сплавов. Установлено положительное влияние применения кислородсодержащих полимерных присадок на основные показатели обрабатываемости при сверлении труднообрабатываемых металлов, при этом достигается уменьшение в среднем на 35% крутящего момента как параметра, определяющего износостойкость режущего инструмента и снижение шероховатости обработанной поверхности в среднем на 10%. Полученные результаты демонстрируют высокую степень корреляции.

Разработаны принципы выбора и применения активированного коронным разрядом СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками для повышения эффективности лезвийной обработки точением и сверлением жаропрочных сплавов. Предложены оптимальные составы СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками и рациональные режимы их использования. Широкое промышленное применение данных смазочно-охлаждающих технологических средств ведущими авиационными предприятиями позволит значительно повысить производительность лезвийной обработки резанием труднообрабатываемых материалов, а также существенно улучшить показатели качества обработанной поверхности по сравнению с применением традиционно используемых базовых СОТС при обеспечении санитарно-гигиенических норм рабочей зоны на производстве.

Список источников

1. Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Дмитриев А.И. и др. Фундаментальные и прикладные аспекты материаловедения в трибологии // Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27. № 6. С. 5-32. DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_6_5-32
2. Huang Q., Shi X., Xue Y., et al. Synergetic effects of biomimetic microtexture with multi-solid lubricants to improve tribological properties of AISI 4140 steel // Tribology International. 2022. Vol. 167: 107395. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107395
3. Niu W., Yuan M., Wang P., et al. One-pot synthesis of SIB@ZIF-8 with enhanced anti-corrosion properties and excellent lubrication properties // Tribology International. 2020. Vol. 151: 106491. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106491

4. Мигранов М.Ш., Наумов А.Г., Репин Д.С. и др. Износостойкость режущего инструмента с инновационными многослойными покрытиями при применении активированных полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 6. С. 271-275. DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-6-271-275
5. Репин Д.С., Наумов А.Г., Бубнов В.Б. и др. О некоторых аспектах применения активированных коронным разрядом полимерсодержащих СОТС при обработке металлов резанием // Металлообработка. 2022. № 1(127). С. 3-10. DOI: 10.25960/mo.2022.1.3
6. Sultana Mst. N., Dhar N.R., Zaman B. A review on different cooling/lubrication techniques in metal cutting // American Journal of Mechanics and Applications. 2019. Vol. 7. No. 4, pp. 71-87. DOI: 10.11648/j.ajma.20190704.11
7. Григорьев С.Н. Резание материалов. Режущий инструмент в 2 ч. Часть 1. М.: Изд-во Юрайт, 2024. 263 с.
8. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Мухамедеев В.Р. и др. Применение сухого электростатического охлаждения при резании труднообрабатываемых материалов // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22. № 4(82). С. 12-18.
9. Репин Д.С., Наумов А.Г., Бубнов В.Б. и др. Некоторые результаты применения кислородсодержащих полимерных присадок к СОТС активированных коронным разрядом при механической обработке металлов резанием // Пожарная и аварийная безопасность. 2022. № 4(27). С. 65-72.
10. Królczuk G.M., Maruda R., Królczuk J.B., et al. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production—A review // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 218, pp. 601-615. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.017
11. Наумов А.Г., Комельков В.А., Емченко Д.В. и др. Влияние микродоз йода как компонента смазочно-охлаждающих технологических средств при обработке металлов резанием // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 2(35). С. 78-85.
12. Ross N.S., Mia M., Anwar S., et al. A hybrid approach of cooling lubrication for sustainable and optimized machining of Ni-based industrial alloy // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 321. No. 3: 128987. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128987
13. Дамдинов Б.Б., Митыпов Ч.М. Исследования коэффициента трения. Вывод аналитического уравнения диаграммы Герси-Штрибека // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2022. Т. 15. № 7. С. 835-849. DOI: 10.17516/1999-494X-0439
14. Park K.H., Suhaimi M.A., Yang G.D., et al. Milling of titanium alloy with cryogenic cooling and minimum quantity lubrication (MQL) // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2017. Vol. 18. No. 1, pp. 5-14. DOI: 10.1007/s12541-017-0001-z
15. Wang X., Zhang X., Wang C., et al. High temperature tribology behavior of silicon and nitrogen doped hydrogenated diamond-like carbon (DLC) coatings // Tribology International. 2022. Vol. 175: 107845. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107845
16. Никитин К.А., Мордус Н.А., Евстратенко М.В. Анализ влияния криогенной обработки на работоспособность режущего инструмента // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе — сегодня и завтра: Сборник научных статей VIII Международной научно-практической конференции (15 ноября 2024; Гомель, Республика Беларусь). Гомель: Гомсельмаш, 2024. Часть 1. С. 211-214.
17. Козочкин М.П., Порватов А.Н. Разработка переносного и интегрированного диагностического комплекса для анализа процессов резания материалов // Контроль. Диагностика. 2017. № 1. С. 44-48. DOI: 10.14489/td.2017.01.pp.044-048
18. Козочкин М.П., Порватов А.Н., Дуйсенгали А. Система адаптивного управления станочным оборудованием по сигналам вибрации и активной мощности // Автоматизация и управление в машиностроении. 2016. № 1(23). С. 17-25.
19. Погоньшев В.А., Погоньшева Д.А. Искусственный интеллект как инструмент современной трибологии // Современные тенденции развития аграрной науки: Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции (07–08 декабря 2023; Брянск). Брянск: Изд-во БГАУ, 2023. С. 479-485.
20. Советканов А.Б., Шаяхметов Е.Я., Мейрбеков Р.Б. Влияние СОТС и температурного режима резания на эффективность процесса резания // Вестник Университета Шакарима. Серия Технические науки. 2024. Т. 1. № 13. С. 62-72. DOI: 10.53360/2788-7995-2024-1(13)-9
21. Сырбу С.А., Наумов А.Г., Колбашов М.А. Методика предварительной оценки эффективности смазочного материала в зоне контакта трибосопряженных металлических поверхностей // Трибология — машиностроению: Сборник статей XV Международной научно-технической конференции (12–13 ноября 2024; Москва). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2024. С. 209-211.
22. Савельева Л.В., Вендин И.О. Влияние режимов резания на величину износа передней поверхности инструмента при механической обработке заготовок // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 209-215. DOI: 10.34759/vst-2019-4-209-215

References

- Kolubaev AV, Kolubaev EA, Dmitriev AI, et al. Fundamental and applied aspects of materials science in tribology. *Physical Mesomechanics*. 2024;27(6):5-32. (In Russ.). DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_6_5-32
- Huang Q, Shi X, Xue Y, et al. Synergetic effects of biomimetic microtexture with multi-solid lubricants to improve tribological properties of AISI 4140 steel. *Tribology International*. 2022;167:107395. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107395
- Niu W, Yuan M, Wang P, et al. One-pot synthesis of SIB@ZIF-8 with enhanced anti-corrosion properties and excellent lubrication properties. *Tribology International*. 2020;151:106491. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106491
- Migranov MSh, Naumov AG, Repin DS, et al. Wear resistance of cutting tools with innovative multilayer coatings when using activated polymercontaining. lubricating-cooling technological means. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. 2023(6):271-275. (In Russ.). DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-6-271-275
- Repin DS, Naumov AG, Bubnov VB, et al. The metal cutting application aspects of materials which contain polymers and activated by corona discharge. *Metalloobrabotka*. 2022;127(1):3-10. (In Russ.). DOI: 10.25960/mo.2022.1.3
- Sultana MstN, Dhar NR, Zaman B. A review on different cooling/lubrication techniques in metal. *American Journal of Mechanics and Applications*. 2019;7(4):71-87. DOI: 10.11648/j.ajma.20190704.11
- Grigoriev SN. *Cutting of materials. Cutting tool. Part 1*. Moscow: Yurait; 2024. 263 p. (In Russ.). (In Russ.).
- Migranov MSh, Migranov AM, Mukhamadeev VR, et al. Application of static cool dry cutting in the cutting process. *Vestnik UGATU*. 2018;22(4):12-18. (In Russ.).
- Repin DS, Naumov AG, Bubnov VB, et al. Some results of the application of oxygen-containing polymer additives to lut activated by corona discharge in mechanical processing of metals by cutting. *Pozharnaya i avariinaya bezopasnost'*. 2022; 27(4):65-72. (In Russ.).
- Królczyk GM, Maruda R, Królczyk JB, et al. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production—A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019;218:601-615. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.017
- Naumov AG, Komelkov VA, Emchenko DV, et al. The influence of micro-doses of iodine, as a component of SOTS when processing metals by cutting. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchity*. 2020(2):78-85. (In Russ.).
- Ross NS, Mia M, Anwar S, et al. A hybrid approach of cooling lubrication for sustainable and optimized machining of Ni-based industrial alloy. *Journal of Cleaner Production*. 2021;321(3):128987. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128987
- Damdinov BB, Mitypov ChM. Studies of the Coefficient of Friction. Derivation of the Analytical Equation of the Hersey- Shtribek Diagram. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2022;15(7):835-849. (In Russ.). DOI: 10.17516/1999-494X-0439
- Park KH, Suhaimi MA, Yang GD, et al. Milling of titanium alloy with cryogenic cooling and minimum quantity lubrication (MQL). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2017;18(1):5-14. DOI: 10.1007/s12541-017-0001-z
- Wang X, Zhang X, Wang C, et al. High temperature tribology behavior of silicon and nitrogen doped hydrogenated diamond-like carbon (DLC) coatings. *Tribology International*. 2022;175:107845. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107845
- Nikitin KA, Mordus NA, Evstratenko MV. Analysis of the effect of cryogenic treatment on the performance of cutting tools. *VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse - segodnya i zavtra" (November 15, 2024; Gomel, Republic of Belarus)*. Gomel: Gomsel'mash, 2024. Part 1. p. 211-214. (In Russ.).
- Kozochkin MP, Porvatov AN. The development of portable and integrated diagnostic system for the analysis of processes of cutting materials. *Kontrol'. Diagnostika*. 2017(1):44-48. (In Russ.). DOI: 10.14489/td.2017.01.pp.044-048
- Kozochkin MP, Porvatov AN, Duisengali A. Adaptive control system for machine tools based on vibration and active power signals. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashinostroenii*. 2016(1):17-25. (In Russ.).
- Pogonyshev VA, Pogonysheva DA. Artificial intelligence as a tool of modern tribology. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye tendentsii razvitiya agrarnoi nauki" (December 07-08, 2023; Bryansk)*. Bryansk: BGAU; 2023. p. 479-485. (In Russ.).
- Sovetkanov A, Shayakhmetov Ye, Meirbekov R. Refinement of the parametric model of roughness formation by conducting an experiment. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*. 2024;1(13):62-72. (In Kazakh). DOI: 10.53360/2788-7995-2024-1(13)-9
- Syrbu SA, Naumov AG, Kolbashov MA. Method of preliminary assessment of the effectiveness of a lubricant in the contact zone of tribo-conjugated metal surfaces. *Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Tribologiya - mashinostroeniyu" (November 12-13, 2024; Moscow)*. Moscow: IMASH RAS; 2024. p. 209-211. (In Russ.).
- Savel'eva LV, Vendin IO. Cutting conditions effect on tool front surface wear rate while workpieces machining. *Aerospace MAI Journal*. 2019;26(4):209-215. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2019-4-209-215.

Статья поступила в редакцию / Received 16.02.2025
 Одобрена после рецензирования / Revised 28.05.2025
 Принята к публикации / Accepted 02.06.2025