

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.895

АКТИВАЦИЯ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПРИСАДОК И ПОКРЫТИЙ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

М.Ш. МИГРАНОВ¹, д-р техн. наук, А.С. ГУСЕВ¹, асп., Н.В. КОЛОСОВА¹, асп.,
А.М. МИГРАНОВ¹, асп., Д.С. РЕПИН², ст. препод., А.Г. НАУМОВ², д-р техн. наук

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
127055, Москва, Вадковский пер., 1, e-mail: migmars@mail.ru

²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России
153040, Иваново, пр. Строителей, 33

© Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Колосова Н.В.,
Мигранов А.М., Репин Д.С., Наумов А.Г., 2023

Рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента при лезвийной обработке точением нержавеющей стали и жаропрочного сплава на основе применения механизма формирования металлополимерных соединений. Отмечено, что образование таких соединений при лезвийной обработке металлов резанием осуществляется путем применения активированного коронного разряда, обеспечивающего комплексное воздействие на контактные процессы поверхностного слоя металлорежущего инструмента с наноструктурированными износостойкими покрытиями. По результатам экспериментальных исследований установлено повышение износостойкости твердосплавного инструмента на 30 % при применении сухого электростатического охлаждения и смазочно-охлаждающих технологических сред с кислородсодержащими полимерными присадками, а также повышение периода стойкости металлорежущего инструмента с наноструктурированными износостойкими покрытиями. Подтверждена возможность обеспечения наибольшей эффективности при их комплексном применении в машиностроительном производстве.

Ключевые слова: металлорежущий инструмент, точение, смазочно-охлаждающие технологические среды, кислородсодержащие полимерные присадки, сухое электростатическое охлаждение, активация, коронный разряд.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-4-5-13

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного машиностроительного производства и импортозамещения существует острая необходимость в создании и внедрении инновационных обрабатываемых материалов для разработки высокоэффективных конструкций узлов машин, чтобы соответствовать жестким требованиям к показателям качества и точности обработанной поверхности детали при лезвийной обработке резанием, а также требованиям, касающимся понижения негативного воздействия на экологию окружающей среды. Большую важность имеет вопрос повышения эффективности механической обработки путем разработки и внедрения новых технологических процессов, сочетающих в себе комплексное воздействие на контактные процессы в зоне резания. Согласно исследованиям [1–6] и производственному опыту, в большинстве случаев в современном машиностроительном производстве рост

производительности лезвийной обработки резанием достигается за счет форсирования режимов путем применения инновационных наноструктурированных износостойких покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в комбинации с различными активационными воздействиями. Такие дополнительные воздействия на контактные процессы в зоне резания (с учетом возможности проявления различных физических эффектов) позволяют существенно снизить термомеханическую напряженность и в дальнейшем повысить износостойкость режущего инструмента, а также улучшить показатели качества обработанной поверхности. Известно, что склонность некоторых обрабатываемых материалов, таких как бериллиевые, магниевые и другие сплавы, к диффузионным процессам с поглощением активированных газов обработанной поверхностью приводит к ухудшению химического состава и снижению прочностных и упругих свойств изготавливаемой детали. Вместе с тем применение СОТС при лезвийной обработке резанием титановых сплавов является обязательным для обеспечения пожарной безопасности на производстве. Освоение новых обрабатываемых материалов с уникальными физико-механическими свойствами и их сохранение во всем объеме изготавливаемых деталей требуют применения современного высокопроизводительного металлорежущего оборудования с мехатронными системами. Последние позволяют вести скоростную и сверхвысокоскоростную обработку резанием на основе использования инновационных многослойных наноструктурированных износостойких покрытий в сочетании с высокоэффективными СОТС и с последующей их активацией при различных дополнительных воздействиях.

Целью работы является повышение эффективности обработки резанием различных групп сталей и сплавов, а также улучшение показателей качества обработанной поверхности путем активации коронным разрядом кислородсодержащих полимерных присадок на поверхности металлорежущего инструмента с наноструктурированными многокомпонентными износостойкими покрытиями.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В настоящее время ведется активный поиск альтернативных способов улучшения температурно-силовых условий резания и в целом повышения производительности обработки резанием на основе комбинированного воздействия на применяемые СОТС, а также дополнительного воздействия на поверхности режущего инструмента с износостойкими покрытиями. Согласно многочисленным исследованиям [4–9], наиболее перспективным направлением является комбинированное воздействие озонированного воздушного потока на контактные процессы. Использование воздуха в виде рабочей среды предпочтительно по причинам дешевизны и доступности. Большинство промышленных производств оснащено центральной заводской сетью для подачи сжатого воздуха на рабочие места. При необходимости возможна подводка к металлорежущему оборудованию индивидуального баллона со сжатым воздухом. Принцип работы системы сухого электростатического охлаждения (СЭО) (рис. 1) заключается в том, что ионизированный (называется также озонированным, так как воздух пахнет озоном) воздушный поток от установки подводится в зону резания «инструмент – деталь». Процесс ионизации (озонации) осуществляется при прохождении сжатого воздушного потока между сопловым аппаратом и высоковольтным электродом за счет подачи регулируемого напряжения от установки СЭО «Варкаш». При этом подача сжатого воздуха ведется по воздуховоду от баллона (или от заводской централизованной системы подачи сжатого воздуха) через регулируемый манометр. Ионизированный воздушный поток под давлением, которое

регулируется манометром, направляется в рабочую зону (зону резания). Промышленный образец установки «Варкаш» питается от обычной сети с напряжением 220 В и имеет на передней панели тумблеры для включения и регулирования величины выходного напряжения и тока, передаваемых по специальному изолированному высоковольтному кабелю на иглу (электрод) и сопло (катод). При этом на поперечном сечении конца иглы и на самом узком месте (выходе) сопла (сопловой аппаратуры) происходит озонация (активация) проходящего воздушного потока. Озонированный воздушный поток направляется в зону резания на поверхность режущего инструмента с покрытием.

Основные узлы и электротехнические элементы закреплены внутри заземленного корпуса установки и обеспечивают высокую степень электро-безопасности при работе в производственных помещениях.

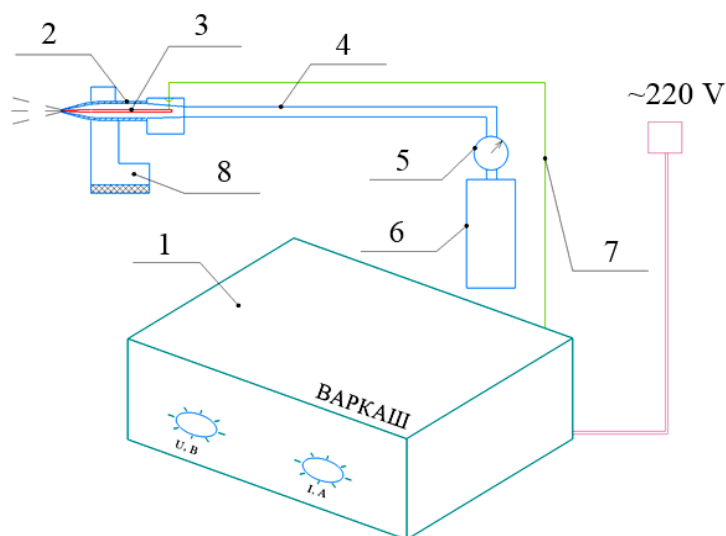


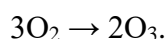
Рис. 1. Схема установки СЭО «Варкаш»: 1 – источник питания; 2 – сопло (сопловой аппарат); 3 – игла; 4 – воздухопровод; 5 – манометр; 6 – источник сжатого воздуха; 7 – высоковольтный кабель; 8 – приспособление для крепления сопловой аппаратуры к металлорежущему станку

Применение СЭО (как одного из перспективных СОТС) при операциях лезвийной обработки резанием с использованием традиционных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и режущего инструмента с износостойкими покрытиями, согласно многочисленным исследованиям [7–12], основано на активационной, охлаждающей, проникающей, пластифицирующей и смывающей, а также модифицирующей функциях. Смазывающая функция СЭО заключается в интенсивном формировании оксидной пленки на границе трущихся поверхностей режущего инструмента и обрабатываемой детали вследствие адсорбции и химических реакций при высоких температурах в контактной зоне. Смачивающее и проникающее действие осуществляется путем образования заряженных частиц и их последующего направленного движения по гидродинамическому подобию, но уже в виде воздушного потока при разности их потенциала. Пластифицирующая функция связана с эффектом Ребиндера (снижением прочности контактирующих поверхностей вследствие снижения поверхностной энергии твердого тела из-за физико-химических процессов) и приводит к формированию мягкого слоя в виде смазочного материала. Одна из особенностей применения СЭО – формирование сильного электрического поля и направленного

движения униполярно заряженных частиц, определяющих как приток, так и отток электронов с трущихся поверхностей. На основе вышеизложенного, а также согласно исследованиям [10, 12, 13], путем изменения режима работы установки СЭО можно модифицировать поверхностный слой, управляя фазовым и элементным составом (в том числе и применяемого износостойкого покрытия).

Исследования, представленные в работах [6–8], показали, что воздействие коронным разрядом на СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками и «сухое» резание ионизированным потоком воздуха, подаваемым в зону резания, позволяют улучшить характеристики процесса резания (повышается период стойкости режущего инструмента, снижается температурно-силовая нагруженность зоны резания, уменьшается шероховатость обработанной поверхности). Так, в указанных работах продемонстрирован положительный эффект от применения поливинилового спирта (ПВС) в качестве кислородсодержащей присадки к СОТС. Повышение эффективности обработки металлов резанием с использованием полимерных присадок объясняется образованием пленок с различной структурой (со смазывающим и упрочняющим эффектом) на контактных площадках резца и стружки. Следует отметить, что, к сожалению, состав пленок не всегда поддается расшифровке. На основании полученных экспериментальных данных, а также при учете состава применяемого вещества можно предположить, что пленки, образующиеся на поверхности режущего инструмента, имеют металлополимерную природу. В работе был использован полуэмпирический параметрический метод из квантовой химии (Parametric Method) РМЗ, который хорошо себя зарекомендовал себя при анализе структуры и свойств неорганических и органических соединений [7, 8]. Для проведения квантово-химических расчетов использовался элементарный фрагмент ПВС.

Коронный разряд представляет собой направленный поток заряженных частиц. При воздействии такого заряда возможно образование молекул озона из молекул кислорода по реакции



Известно, что озон является веществом с высокой химической активностью и способен инициировать окисление поливинилового спирта по радикальному механизму [12].

Под действием коронного разряда и озона происходит отрыв водорода от атома углерода углеродной цепи ПВС с образованием вторичных и третичных алкильных радикалов [8] (рис. 2).

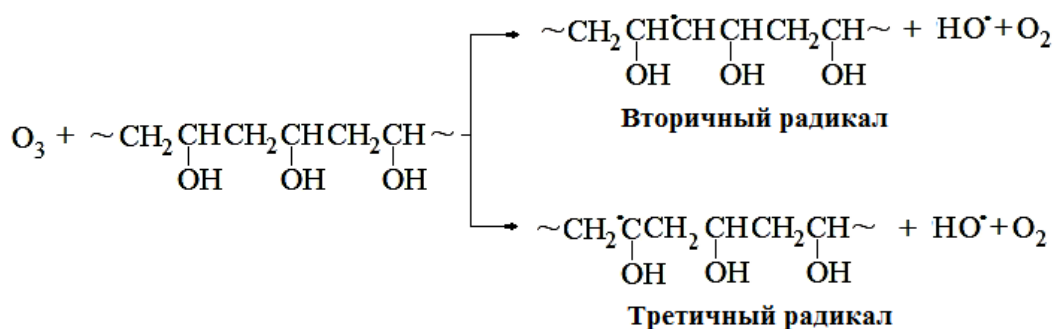


Рис. 2. Схема реакции образования вторичного и третичного алкильных радикалов ПВС при воздействии коронного разряда

Согласно исследованиям [14, 15], при применении на режущем инструменте современных наноструктурированных покрытий из-за высоких температурно-силовых нагрузок в контактной зоне (зоне резания) происходят окислительные процессы с формированием аморфноподобных структур с высокой износостойкостью и со смазочным эффектом, образование которых можно дополнительно интенсифицировать путем подвода озонированного воздуха в зону резания.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения вышеизложенных гипотез были проведены серии натуральных износостойкостных испытаний режущего инструмента при точении различных марок сталей и сплавов с СЭО. Делалось это как с использованием СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками, так и с применением современных наноструктурированных износостойких покрытий. Натурные эксперименты при точении осуществлялись на токарном станке модели 16К20. В качестве СОТС использовались СОЖ и воздух, ионизированный при различном расположении соплового аппарата; в качестве материала – труднообрабатываемые стали и сплавы марок 12Х18Н10Т, ЭИ-698ВД и др. Применялся твердосплавный инструмент с режущей частью из ВК8 и ВК10 ОМ. Обработка выполнялась для условий получистового и чистового точения при скоростях резания $V = 110$ и 95 м/мин соответственно; подачах инструмента $S = 0,11$ и $0,08$ мм/об; глубинах резания $t = 0,5$ и $0,4$ мм.

Подача ионизированного воздуха с давлением $0,1...0,4$ МПа и выходного тока силой $30...70$ мА в зону резания производилась по следующим схемам: при односопловом аппарате на переднюю поверхность инструмента; при двухсопловом аппарате на переднюю и заднюю поверхности (рис. 3); при трехсопловом аппарате по трем направлениям (передняя, задняя и тыльная поверхности инструмента).

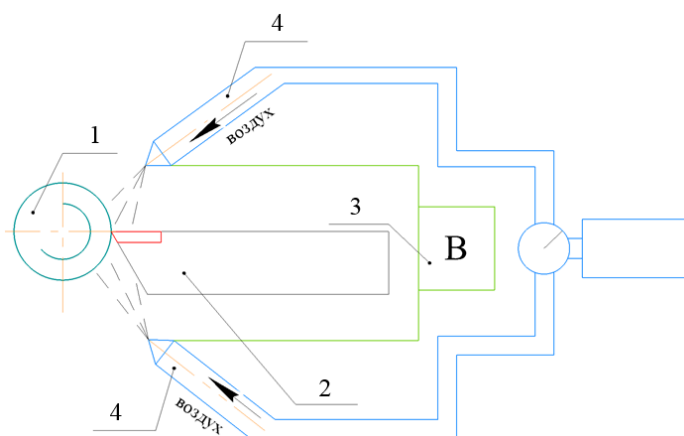


Рис. 3. Подача ионизированного воздуха по двухсопловой схеме: 1 – заготовка; 2 – резец; 3 – установка «Варкаш»; 4 – сопловой аппарат с коронирующим электродом

Период стойкости режущего инструмента (T) рассчитывался по формуле

$$T = \frac{L}{S},$$

где L – длина пути резания, соответствующая критическому износу режущего инструмента (для условий получистового и чистового точения принят критический износ по задней поверхности $h_3^{кр} = 0,3$ мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные натурные испытания износостойкости при лезвийной обработке пары «обрабатываемый и инструментальный материалы» (12X18H10T – BK8) представлены на рис. 4 и 5. Результаты исследования влияния ионизированного воздуха при использовании СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками на износ режущего инструмента по задней поверхности, а также на критическую длину пути резания и период стойкости показали:

кривая износа монотонно возрастает и при критических длинах пути резания переходит к катастрофическому износу (рис. 4);

наибольшая длина пути резания и период стойкости обеспечиваются при применении СЭО + СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками. Наблюдается увеличение их значений на 30 % (рис. 5).

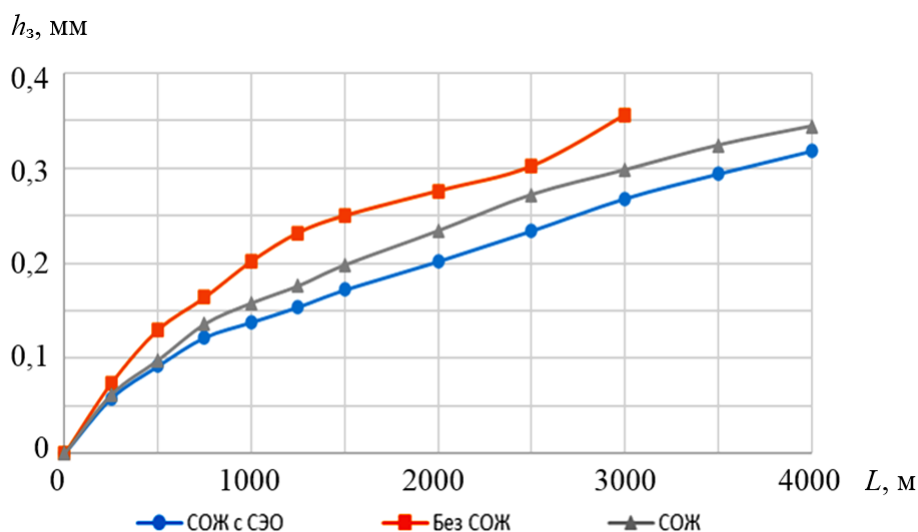


Рис. 4. Влияние длины пути резания на износ по задней поверхности h_3 при резании 12X18H10T – BK8 ($v = 110$ м/мин, $S = 0,11$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

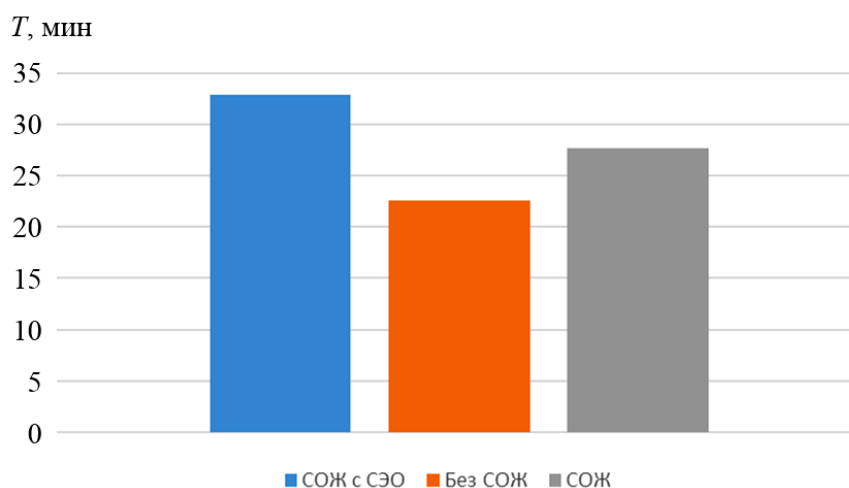


Рис. 5. Зависимость периода стойкости инструмента T от применения СОТС и использования СЭО при точении 12X18H10T – BK8 ($v = 110$ м/мин, $S = 0,11$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

По результатам экспериментов при точении жаропрочного сплава ЭИ-698ВД твердосплавным инструментом ВК10 ОМ с различными наноструктурированными износостойкими покрытиями и применении СЭО установлено (рис. 6, 7), что наибольшая длина пути резания и период стойкости режущего инструмента обеспечиваются при применении СЭО (соответственно, при нанесении покрытий AlTiN, TiAlN, AlTiCrN). При этом покрытие AlTiN + СЭО в 2,5 и 3 раза повышает период стойкости по сравнению с резанием инструментом без покрытия и при сухом электростатическом охлаждении. Согласно исследованиям [9, 10, 15], увеличение износостойкости режущего инструмента с наноструктурированными покрытиями связано с формированием защитных структур с повышенной твердостью и со смазывающим эффектом при определенных температурно-силовых условиях в контактной зоне резания.

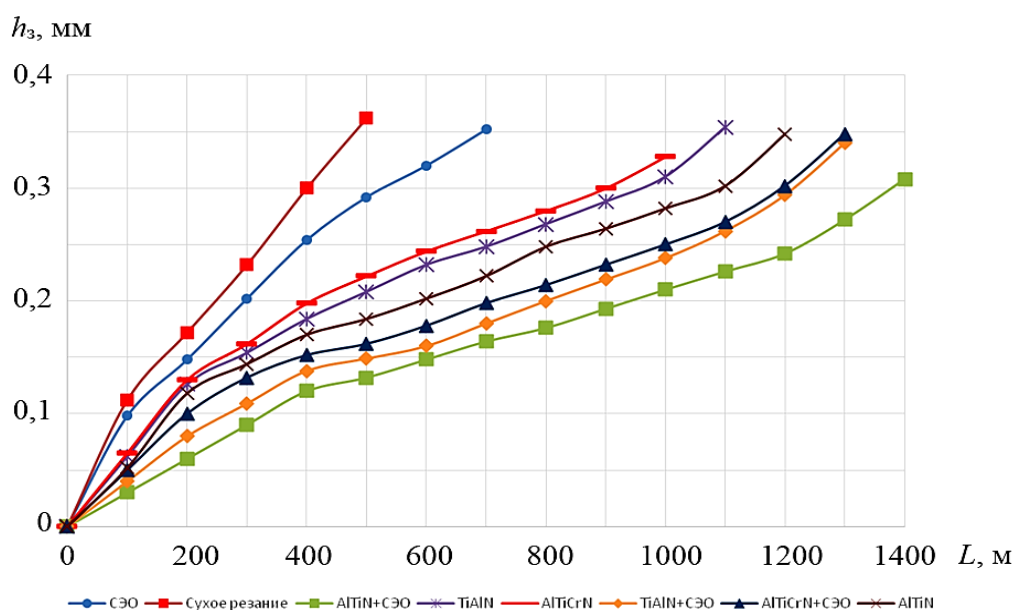


Рис. 6. Влияние длины пути резания на износ по задней поверхности инструмента при точении ЭИ698ВД – ВК10 ОМ с различными покрытиями и СЭО ($v = 95$ м/мин, $S = 0,08$ мм/мин, $t = 0,4$ мм)

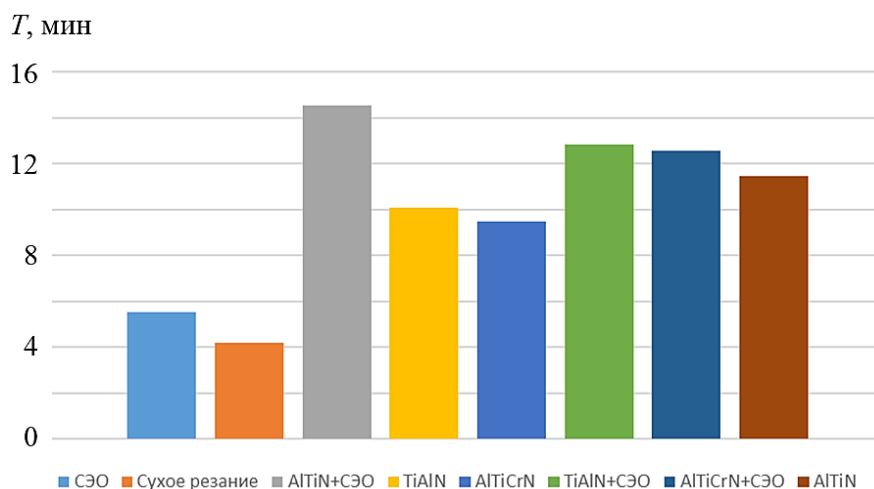


Рис. 7. Зависимость периода стойкости режущего инструмента от применяемого покрытия и СЭО при точении ЭИ698ВД – ВК10 ОМ ($v = 95$ м/мин, $S = 0,08$ мм/мин, $t = 0,4$ мм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное применение коронного разряда и СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками при точении нержавеющей сталей твердосплавными режущими инструментами в ряде случаев позволяет повысить период стойкости более чем на 30 % по сравнению с сухим резанием.

Использование метода СЭО при точении жаропрочных сплавов твердосплавным режущим инструментом с износостойкими покрытиями позволяет увеличить период стойкости в 2,5 и 3 раза, что повышает надежность работы режущего инструмента. Это имеет очень большое значение в механообработке, особенно при эксплуатации гибких автоматизированных производств и станков с числовым программным управлением. Полученные экспериментальные данные рекомендуются использовать при назначении режимов резания.

Эффективность применения метода СЭО в комбинации с другими традиционными методами улучшения эксплуатационных свойств режущего инструмента при точении труднообрабатываемых материалов проявляется в довольно широком диапазоне режимов резания и может быть обеспечена при более высоких скоростях резания (для твердых сплавов – 150...300 м/мин).

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов. М.: Машиностроение. 1984. 224 с.
2. Ахметзянов И.Д., Ильин В.И., Кирий В.Г. Влияние униполярного коронного разряда на процесс обработки резанием // Электрофизические процессы в сильных электрических и магнитных полях: межвуз. сб. науч. тр. Чебоксары: ЧГУ. 1987. 148 с.
3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение. 1993. 336 с.
4. Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В. Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями. Ульяновск: УлГТУ. 2005. 151 с.
5. Гордон М.Б. Трение, смазка и износ инструмента при резании металлов. Чебоксары: ЧГУ. 1978. 126 с.
6. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение. 2016. 327 с.
7. Некоторые результаты применения кислородсодержащих полимерных присадок к СОТС, активированных коронным разрядом при механической обработке металлов резанием / Д.С. Репин [и др.] // *Пожарная и аварийная безопасность*. 2022. № 4 (27). С. 65–72.
8. Репин Д.С., Наумов А.Г. Об эффективности активации полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке металлов резанием // *Вестник УГАТУ*. 2020. Т. 24. № 2 (88). С. 36–42.
9. Мигранов М.Ш. Повышение износостойкости инструментов на основе интенсификации процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов. Уфа: Гилем. 2011/ 229 с.
10. Применение сухого электростатического охлаждения при резании труднообрабатываемых материалов / М.Ш. Мигранов [и др.] // *Вестник УГАТУ*. 2018. Т. 22. № 4 (82). С. 12–18.

11. Protonation Equilibriums of Porphin, 5,10,15,20-Tetraphenylporphin, 5,10,15,20-Tetrakis(4'-sulfonatophenyl) porphin in Methanol / V.B. Sheinin [et al.] // *Macroheterocycles*. 2012. V. 5. № 3. P. 252–259.

12. Окисление поливинилового спирта в водной среде. II. Кинетическая схема процесса / Ю.С. Зимин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2006. Т. 49. № 2. С. 58–62.

13. Shuster L.Sh., Migranov M.Sh., Sadykova A.Ya. Triboengineering characteristics of ultra-fine granularly structured titanium produced by intensive plastic deformation // *Journal of Friction and Wear*. 2005. V. 26. № 2. P. 208–214.

14. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr,Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating / A. Vereschaka [et al.] // *Tribology International*. 2021. V. 155. P. 106804.

15. Tribological Properties of Multilayer Coatings for Cutting Tool / M.Sh. Migranov [et al.] // *Journal of Friction and Wear*. 2018. № 39 (3). P. 245–250.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Колосова Н.В., Мигранов А.М., Репин Д.С., Наумов А.Г. Активация кислородсодержащих полимерных присадок и покрытий при резании металлов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 4 (20). С. 5–13.

ACTIVATION OF OXYGEN-CONTAINING POLYMERIC ADDITIVES AND COATINGS DURING METAL CUTTING

M.Sh. MIGRANOV¹, Dr. Sc., A.S. GUSEV¹, Graduate, N.V. KOLOSOVA¹, Graduate, A.M. MIGRANOV¹, Graduate, D.S. REPIN², Senior Lecturer, A.G. NAUMOV², Dr. Sc.

¹Moscow State University of Technology «STANKIN»,

1, Vadkovsky lane, 127055, Moscow, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

²Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 33, Builders Av., 153040, Ivanovo, Russian Federation

The paper deals with the issues of increasing the operational properties of metal-cutting tools during blade turning of stainless steel and heat-resistant alloy on the basis of using the mechanism of metal-polymer compounds formation. It is noted that the formation of such compounds during blade machining of metals by cutting is carried out through the use of activated corona discharge, which provides a complex effect on the contact processes of the surface layer of metal-cutting tools with nanostructured wear-resistant coatings. According to the results of experimental researches the increase of wear resistance of hard-alloy tool by 30 % at application of dry electrostatic cooling and lubricating-cooling technological media with oxygen-containing polymeric additives, and also increase of period of durability of metal-cutting tool with nanostructured wear-resistant coatings is established. The possibility of providing the greatest efficiency at their complex application in machine-building production is confirmed.

Keywords: metal-cutting tools, turning, cooling lubricants, oxygen-containing polymer additives, dry electrostatic cooling, activation, corona discharge.

Поступила в редакцию/received: 12.06.2023; после рецензирования/revised: 03.07.2023; принята/accepted: 10.07.2023