



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследование технологии микродозированной подачи смазочных композиций с наночастицами при шлифовании жаропрочного никелевого сплава с дополнительным воздушным охлаждением

Артём Митрофанов^{а, *}, Владимир Носенко^б

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, ул. Энгельса, 42а, г. Волжский, 404121, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-1829-322X>, greenmap@yandex.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>, vladim.nosenko2014@ya.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.011

История статьи:

Поступила: 11 сентября 2019
 Рецензирование: 06 октября 2019
 Принята к печати: 15 ноября 2019
 Доступно онлайн: 15 декабря 2019

Ключевые слова:

Минимальное количество смазки
 Шлифование
 Наночастицы
 Соевое масло
 Холодный воздух
 Никелевый сплав
 Силы резания
 Качество и свойства поверхности

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 18-48-343004 p_мол_a.

АННОТАЦИЯ

Введение. Достаточно значимой проблемой с точки зрения экологии является использование смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в процессе металлообработки. В качестве альтернативы применения СОЖ в мировой практике внедряют экологически ориентированную технологию минимального смазывания (*MQL – minimum quantity lubrication*). Однако в процессе абразивной обработки, где наблюдаются высокие контактные температуры, использование технологии *MQL* не всегда достаточно эффективно. В связи с этим в научном сообществе было предложено, например, добавление в смазочные композиции наночастиц различных веществ или использование дополнительного охлаждения зоны резания холодным воздухом (*CAMQL – cold air with minimum quantity lubrication*). В рамках нашей статьи проводились исследования применения данных способов как отдельно, так и в синтезе с целью оценки возможности повышения эффективности технологии *MQL* при шлифовании жаропрочного никелевого сплава. **Цель работы:** определить влияние технологии подачи *MQL* и *CAMQL* на эксплуатационные показатели процесса шлифования и свойства поверхностного слоя. В качестве смазочной среды использовали растительное соевое масло, в том числе и с добавлением наночастиц Al_2O_3 . **Методы исследования.** Шероховатость обработанной поверхности контролировали профилографом-профилометром *Mitutoyo Surftest SJ-410*. Составляющие силы резания измеряли с использованием шестикомпонентного силоизмерительного комплекса *Amti MC36-1000*. Элементный анализ и оценку морфологии обработанной поверхности проводили с помощью растрового электронного микроскопа *Versa 3D* с микрорентгеноспектральной приставкой. Контактную разность потенциалов измеряли посредством атомно-силовой микроскопии методом зонда Кельвина. **Результаты и обсуждение.** Установлены наилучшие условия применения технологии *MQL* и *CAMQL*: расход смазочной среды – 30 мл/ч, величина воздушного потока для технологии *CAMQL* – 12 м³/ч. Результаты измерения силы резания показали, что при использовании в качестве смазки соевого масла наиболее эффективна технология *CAMQL*. При добавлении 0,4 мас. % наночастиц Al_2O_3 с концентрацией в 0,4 мас. % наблюдается значительное снижение силы резания, например, составляющая P_y относительно шлифования без СОЖ уменьшается на 30 %, параметр шероховатости обработанной поверхности Ra – в среднем в 1,5 раза. При использовании технологий *MQL* и *CAMQL* составляющие силы резания практически одинаковы. При использовании смазочных композиций с наночастицами имеется тенденция на более низкие значения шероховатости поверхности при шлифовании с технологией *CAMQL*. Исследования состояния тонкого поверхностного слоя после шлифования показали, что применение технологии *CAMQL* обеспечивает снижение окисления поверхности и улучшение ее свойств. При использовании составов с наночастицами Al_2O_3 наблюдается уменьшение следов адгезионного взаимодействия на обработанной поверхности.

Для цитирования: Митрофанов А.П., Носенко В.А. Исследование технологии микродозированной подачи смазочных композиций с наночастицами при шлифовании жаропрочного никелевого сплава с дополнительным воздушным охлаждением // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 6–18. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-6-18.

Введение

В связи с развитием технологий и все большее внимание к проблемам защиты окружающей среды в последнее время появилось ряд научных работ, посвященных внедрению технологии подачи минимального количества смазки (*MQL*) на

*Адрес для переписки

Митрофанов Артём Петрович, к.т.н., доцент
 Волжский политехнический институт (филиал)
 Волгоградского государственного технического университета, ул. Энгельса, 42а,
 г. Волжский, 404121, Россия
 Тел.: +7 (8443) 55-69-35, e-mail: greenmap@yandex.ru

операциях металлообработки, так как достаточно значимой проблемой с точки зрения экологии является использование в машиностроении смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Однако в процессе абразивной обработки, где наблюдаются высокие контактные температуры, использование *MQL* в обычном ее представлении не всегда эффективно по сравнению с охлаждением СОЖ. В научном сообществе были предприняты меры повышения эффективности шлифования при использовании технологии *MQL*. Достаточно значимого эффекта добились авторы работ [1, 2] применением дополнительного охлаждения зоны резания криогенными средами (жидкий азот, CO_2). Сложность конструкции подвода и хранения криогенных сред создают проблемы дальнейшего развития данного направления. В работе [3] предложено охлаждать зону контактного взаимодействия с помощью вихревой трубы (на основе вихревого эффекта). Такой способ достаточно прост в реализации, но эффективность его без использования смазки не столь высока. В развитие данного направления авторами работ [4,5] исследуется технология подачи минимального количества смазочной среды в охлажденном воздухе (*CAMQL* – *cold air with minimum quantity lubrication*) посредством использования вихревой трубы. В работе [5] авторами предлагается использовать минеральное масло, что несколько противоречит концепции экологического шлифования. Не менее интересным, а главное результативным направлением повышения эффективности технологии *MQL* является применение в смазочных композициях различных наночастиц [6,7]. В качестве наночастиц в составах для *MQL* применяют MoS_2 , Al_2O_3 , наноалмазы, углеродные нанотрубки (УНТ), SiO_2 , TiO_2 [8]. При внесении в состав для *MQL* наночастиц в процессе шлифования наблюдается снижение контактной температуры и коэффициента трения, повышается износостойкость абразивного инструмента, таким образом, изменяется характер контактного взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом, т. е. их можно назвать наномодификаторами [9]. В работе [10] представлено исследование влияния смазочной среды на базе растительного масла с добавкой наночастиц Al_2O_3 при шлифовании никелевого сплава *Inconel 600* с применением технологии *MQL*. Согласно полученным результа-

там уменьшаются шероховатость обработанной поверхности, температура и сила резания.

Цель работы – определить влияние технологии подачи *MQL* и *CAMQL* на эксплуатационные показатели процесса шлифования и свойства тонкого поверхностного слоя.

Методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований использовали плоскошлифовальный станок с ЧПУ *CHEVALIER* модель *Smart-B1224III*. Характеристика абразивного инструмента – *25AF100I10V*. В качестве смазочной среды использовали растительное соевое масло, в том числе и с добавлением наночастиц Al_2O_3 .

Режим шлифования: скорость круга $v = 35$ м/с; скорость подачи стола $v_s = 6$ м/мин; подача на глубину $t = 0,01$ мм/ход. Величина припуска, удаляемого за один опыт, 0,5 мм, количество параллельных опытов – три. Анализ имеющихся публикаций по применению технологии подачи *MQL* и *CAMQL* в процессе шлифования показывает, что режим дозирования смазочной среды в зависимости от условий обработки в большинстве случаев варьируется в интервале от 20 до 100 мл/ч [4–7]. В наших исследованиях остановились на двух режимах: 30 и 50 мл/ч. Для подачи воздуха в систему воздушного охлаждения применяли компрессор *AIRRUS CE 250-V135*. В рамках концепции минимального воздействия на окружающую среду в качестве смазочной среды предлагается использовать растительное масло. В работе [11] исследована возможность применения в качестве смазочной среды трех видов растительных масел: кукурузного, горчичного и соевого. По результатам эксплуатационных испытаний установлено, что соевое масло более эффективно.

Устройство подачи минимального количества смазки в охлажденном воздухе (*CAMQL*) реализовано посредством синтеза установки *MQL* (модель *Spraymat 700* производитель *Steidle* Германия) и вихревой трубы. Принцип работы вихревой трубы базируется на вихревом эффекте, сущность которого заключается в снижении температуры в центральных слоях закрученного потока газа (свободного вихря) и повышении температуры периферийных слоев. При соответствующей конструкции устройства вихрь газа

удаётся разделить на два потока: с пониженной и повышенной температурой. Особенностью работы вихревой трубы является регулирование соотношения температуры холодного воздуха от величины потока. В наших исследованиях величина потока составляла 12 и 16 м³/ч при соответствующей температуре воздуха –5 и 0 °С. Выбор величины потока базировался на результатах исследований, представленных в работах [5,12]. Схематично экспериментальная установка показана на рис. 1.

Благодаря возможностям 3D-печати было изготовлено сопло для реализации технологии *SAMQL* (рис.1), в котором сопло подачи *MQL* располагается в центре наконечника с круглым сечением. Угол наклона сопла относительно обрабатываемой заготовки составляет 15°.

Для приготовления смазочных композиций использовали наночастицы Al₂O₃ преимущественно сферической формы с размерной характеристикой 120...190 нм, концентрация наночастиц в составах составляла 0,4 и 0,8 мас. %. С целью предотвращения агломерации наночастиц добавляли поверхностно-активное вещество полисорбат (ТВИН 80) в количестве 0,5 мас.%. Для обеспечения равномерного распределения наночастиц по всему объёму состава и высокой

их дисперсности применяли ультразвуковой гомогенизатор *HD 2200*. Процесс гомогенизации осуществляли в течение 10 мин при установленной мощности 150 Вт.

В качестве обрабатываемого материала выбран жаропрочный сплав ХН45МВТЮБР (ЭП718), являющийся аналогом одного из самого востребованного в мире никелевого сплава *Inconel 718*. Из таких материалов изготавливают ответственные детали авиастроения и химического машиностроения, работающие при высоких температурах. Обладающий прекрасными техническими характеристиками этот сплав очень тяжело обрабатывается резанием, в том числе шлифованием. Для экспериментальных исследований подготовлены образцы размером 75×35×7 мм, которые прошли термообработку по стандартной технологии, в результате чего их твердость составила 37 HRCэ. Термообработанные образцы закрепляли в тисках и выхаживали перед проведением опытов.

В ходе исследований контролировали шероховатость обработанной поверхности по параметру *Ra*, измерения проводили профилографом-профилометром *Mitutoyo Surftest SJ-410* не менее чем в 10 сечениях. Допускаемая основная систематическая погрешность прибора находилась в пределах 3 %.

Составляющие силы резания измеряли с использованием шестикомпонентного силоизмерительного комплекса *Amti MC36-1000*, аналогово-цифрового преобразователя *L-CARD E14-140* и ноутбука со специальным программным обеспечением *Powergraph*. Перевод электрического сигнала в ньютоны осуществляется посредством тарировочных коэффициентов.

Исследования морфологии поверхности обработанных образцов проведены с применением двухлучевого электронного растрового микроскопа *Versa 3D LoVac* при ускоряющем напряжении *U* = 20 кВ. С целью оценки изменений в приповерхностном слое формировали поперечный срез ионным травлением. С использованием интегрированной системы микрорентгеноспектрального энергодисперсионного анализа *EDAX Apollo X* определяли элементный состав поверхностного слоя с высокой степенью локализации.

Измерение контактной разности потенциалов (КРП) осуществляли на атомно-силовом микроскопе «*Solver PRO*» (производства *NT-*

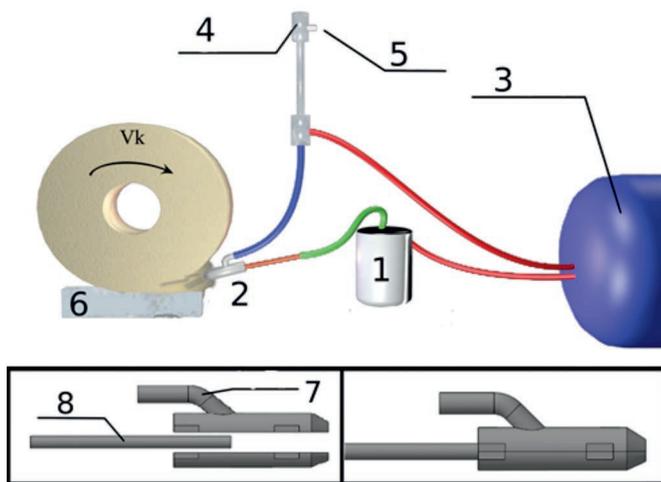


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – система подачи смазки *Spraymat 700*; 2 – сопло; 3 – компрессор; 4 – вихревая труба; 5 – выход горячего воздуха; 6 – заготовка; 7 – подвод холодного воздуха; 8 – трубка подачи масла

Fig. 1. Experimental setup:

1 – *Spraymat 700* lubrication system; 2 – nozzle; 3 – compressor; 4 – vortex tube; 5 – hot air outlet; 6 – workpiece; 7 – supply of cold air; 8 – oil supply pipe

MDT) методом Зонда Кельвина. Применяемый метод основывается на двухпроходной методике. В первом проходе определяется рельеф поверхности образца с применением прерывисто-контактного метода (колебания кантилевера возбуждаются механически). На втором проходе этот рельеф отслеживается при прохождении над образцом на некоторой высоте для определения поверхностного электрического потенциала $\varphi(x)$. Исследования проводились с помощью токопроводящего кантилевера (CSG10/Au) с покрытием из золота.

Перед проведением всех перечисленных исследований для удаления загрязнений с поверхности образца очищали в этаноле с применением ультразвуковой ванны (мощность 50 Вт, продолжительность три минуты).

Результаты и их обсуждение

Первоначально проводили эксплуатационные испытания с применением в качестве смазочной среды соевого масла с режимом дозирования в 50 мл/ч. Оценка составляющих сил резания показала, что при шлифовании с технологией *MQL* силовая нагрузка в конце цикла шлифования несколько выше, чем при обработке без СОЖ (см. таблицу). Здесь, очевидно, сказывается засаливание рабочей поверхности круга и, следовательно, высокая степень адгезии и трения. При использовании технологии *CAMQL* варьировали величину воздушного потока. Из данных таблицы можно наблюдать некоторое снижение составляющих сил резания, причем более заметно это проявляется при величине потока, равного 12 м³/ч, скорее всего, за счет лучшего охлаждающего эффекта.

В дальнейшем рассматривали применение двух подходов, связанных с уменьшением и увеличением количества подаваемой смазки. Пробные испытания с режимом дозирования 100 мл/ч с использованием технологии *MQL* показали увеличение составляющих силы резания P_z и P_y относительно значений, полученных при шлифовании без СОЖ, соответственно на 10 и 15 %. Наблюдается увеличение засаливания рабочей поверхности круга. Анализ публикаций, где авторы используют в качестве смазочной среды растительные масла, показывает, что количество подаваемой смазки составляет не более 50 мл/ч [6, 12].

Исходя из этого принято решение уменьшить величину подачи смазки до 30 мл/ч. Можно констатировать, что при шлифовании с использованием технологии *MQL* относительно значений, полученных при шлифовании без СОЖ, соответствующие значения составляющих силы резания практически одинаковые. Результаты, полученные с применением технологии *CAMQL*, достаточно интересные. При величине воздушного потока 16 м³/ч, по аналогии с *MQL*, значимого эффекта не наблюдается. Однако при потоке 12 м³/ч происходит уменьшение почти на 20 % обеих составляющих силы резания относительно значений при шлифовании без СОЖ. Из рассмотренных режимов обработки такое сочетание дозировки масла и величины потока охлажденного воздуха обеспечивает наибольшее снижение составляющих силы резания.

На следующем этапе проводили испытания смазочных композиций при добавлении наночастиц Al_2O_3 с концентрацией 0,4 мас. % и режимах дозирования 30 и 50 мл/ч. Эффективность данного решения подтверждает полученные результаты (см. таблицу). Так, в отличие от применения в качестве смазки только соевого масла при использовании технологии *MQL* с наночастицами наблюдается уменьшение силы резания в особенности нормальной составляющей на 10 и 30 % с режимами дозирования 50 и 30 мл/ч соответственно. Несколько неоднозначная ситуация отмечается в процессе шлифования с технологией *CAMQL*. Так, значения силы резания при подаче в 50 мл/ч не только не уменьшились, но и несколько возросли. Причиной здесь может быть повышенная вязкость составов. Как известно, добавление наночастиц увеличивает вязкость растворов [13], плюс накладывается фактор низкой температуры воздушного потока, что в совокупности ухудшает отвод смазки при ее большом количестве из зоны резания и снижает вероятность проникновения в зону непосредственного контактного взаимодействия. Уменьшение режима дозирования до 30 мл/ч способствовало улучшению условия шлифования относительно значений, полученных при использовании только соевого масла, тангенциальная составляющая силы резания снизилась на 15 % (величина воздушного потока 12 м³/ч). Силы резания имеют практически одинаковые результаты с данными, полученными по технологии *MQL*.

Влияние условий обработки, режима дозирования и состава смазочных композиций на полученные значения, составляющие их силы резания (P_z, P_y), и шероховатость обработанной поверхности (Ra)

The effect of processing conditions, the dosage regimen and the composition of the lubricating compositions on the obtained values of the components of the cutting forces (P_z, P_y) and the roughness of the treated surface (Ra)

Параметры / Parameters	MQL (соевое масло / soybean oil)			CAMQL (соевое масло / soybean oil)						Без СОЖ / Dry
	–	+Al ₂ O ₃ (0,4 мас.%)	+Al ₂ O ₃ (0,8 мас.%)	–		+Al ₂ O ₃ (0,4 мас. %)		+Al ₂ O ₃ (0,8 мас. %)		
				12 м ³ /ч	16 м ³ /ч	12 м ³ /ч	16 м ³ /ч	12 м ³ /ч	16 м ³ /ч	
	Подача 30 мл/ч (Flow rate 30 ml/h)									
P_z , Н/мм	2,9 ±0,1	2,6 ±0,1	3,1 ±0,1	2,3 ±0,1	2,8 ±0,1	2,5 ±0,1	2,6 ±0,1	2,8 ±0,1	2,9 ±0,1	2,9 ±0,1
P_y , Н/мм	10,0 ±0,5	6,6 ±0,3	8,4 ±0,4	8,1 ±0,3	9,6 ±0,4	6,7 ±0,3	7,8 ±0,3	7,6 ±0,3	7,9 ±0,4	9,7 ±0,3
Ra , мкм	0,75	0,79	0,79	0,75	0,70	0,74	0,69	0,74	0,72	1,11
	Подача 50 мл/ч (Flow rate 50 ml/h)									
P_z , Н/мм	2,9 ±0,1	2,5 ±0,1	–	2,7 ±0,1	2,8 ±0,1	2,8 ±0,1	3,0 ±0,1	–	–	2,9 ±0,1
P_y , Н/мм	10,4 ±0,4	8,7 ±0,3	–	9,2 ±0,3	9,8 ±0,4	9,5 ±0,3	10,4 ±0,5	–	–	9,7 ±0,3
Ra , мкм	0,76	0,75	–	0,80	0,76	0,72	0,67	–	–	1,11

Учитывая положительный опыт применения наночастиц, концентрация Al₂O₃ увеличена до 0,8 мас. %. Испытания смазочных композиций проведены при дозировании 30 мл/ч, так как ранее проведенные исследования показали его эффективность. Вне зависимости от вида технологии микродозированной подачи наблюдали возрастание составляющих силы резания (см. таблицу). В меньшей степени это проявляется при шлифовании с технологией CAMQL. Ввиду полученных результатов проведение исследований с режимом дозирования 50 мл/ч считали нецелесообразным. Таким образом, при увеличении концентрации наночастиц наблюдается рост составляющих силы резания.

Шероховатость обработанной поверхности после шлифования с применением микродозированной подачи смазки уменьшается в среднем в 1,5 раза относительно значений, полученных без использования СОЖ (см. таблицу). Более низкие значения шероховатости

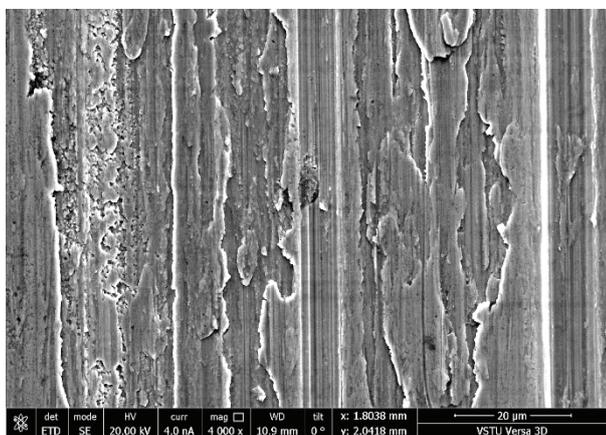
обработанной поверхности при шлифовании с технологией CAMQL получены с добавлением наночастиц и величине воздушного потока 16 м³/ч.

Подводя итоги эксплуатационных испытаний, можно отметить, что лучшие условия применения технологий MQL и CAMQL получены на режиме дозирования смазочной среды 30 мл/ч и величине воздушного потока для технологии CAMQL 12 м³/ч. Результаты согласуются с данными работы [12], где доказана эффективность технологии CAMQL при более низких величинах воздушного потока. Существует некая оптимальная концентрация наночастиц в составах – не всегда большое их количество обеспечивает хороший результат [14,15]. В наших условиях наибольшая эффективность получена при концентрации наночастиц Al₂O₃ 0,4 мас. %.

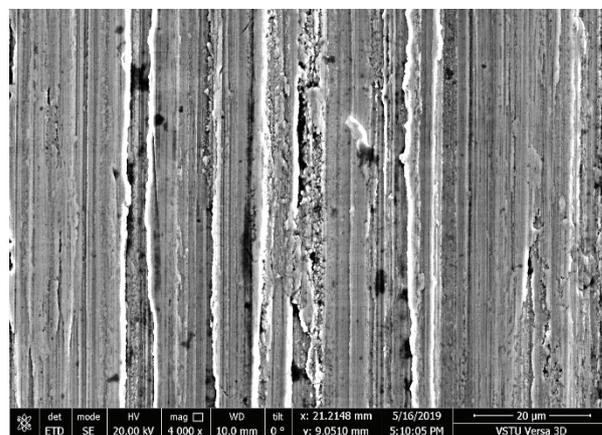
Характеристики свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала зависят от мно-

жества факторов, в том числе существенное влияние оказывают механические и физико-химические превращения, сопровождающие процесс абразивной обработки. При шлифовании без СОЖ состояние обработанной поверхности сви-

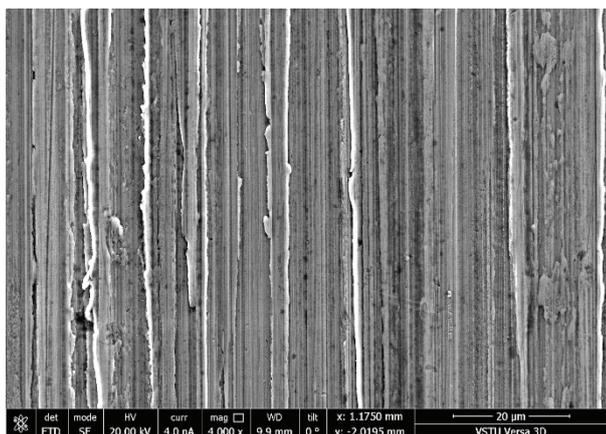
детельствует о значительном адгезионном взаимодействии инструмента с металлом (рис. 2, а). Использование технологии *MQL* заметно улучшает состояние обработанной поверхности (рис. 2, б), однако и здесь имеются в наличии



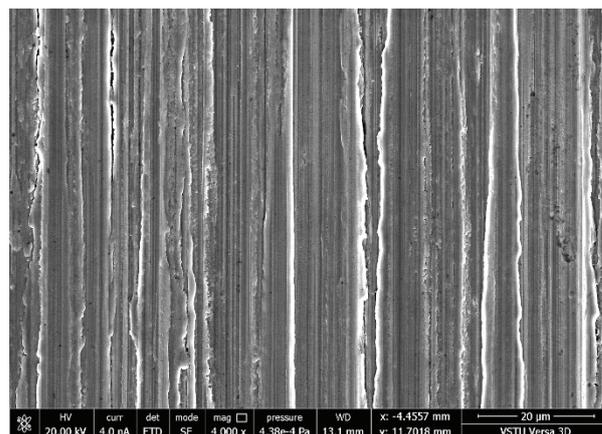
а



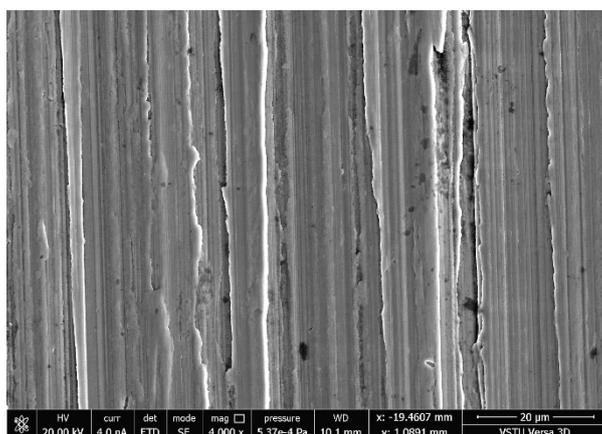
б



в



г



д

Рис. 2. СЭМ-фотографии обработанной поверхности:

а – без СОЖ; б – *MQL*; в – *CAMQL*; г – *MQL* с наночастицами; д – *CAMQL* с наночастицами

Fig. 2. SEM images of the worn surface:

а – dry; б – *MQL*; в – *CAMQL*; г – nanoparticle jet *MQL*; д – nanoparticle jet *CAMQL*

следы адгезионного взаимодействия. Более качественная и однородная поверхность получена после шлифования с технологией *CAMQL* (рис. 2, в). Применение смазочных композиций с наночастицами показывает наилучшие результаты, особенно с использованием технологии *CAMQL* (рис. 2, д).

Наличие наночастиц в зоне контакта изменяет механизм смазывания, снижается адгезия пары абразивный материал–металл, так как между абразивным зерном и обрабатываемым материалом имеется «третье тело», что в итоге отражается на качестве обрабатываемой поверхности. Эффект снижения следов адгезионного взаимодействия при использовании составов с наночастицами зарегистрирован также в работе [16].

По всем рассмотренным выше параметрам применение смазочных композиций с наночастицами Al_2O_3 обеспечивает лучшие результаты. В связи с этим проведен более детальный анализ образцов, полученных после шлифования с использованием технологии *MQL* и *CAMQL* при концентрации наночастиц в составах 0,4 мас. %.

Элементный анализ поперечного сечения образцов показывает, что непосредственно на поверхности, обработанной с применением технологии *MQL* (рис. 3, а), наблюдается значительное количество кислорода – почти 2 %, тогда как у образца после шлифования с технологией

CAMQL кислород на поверхности практически отсутствует, лишь постепенно увеличиваясь в глубину, но не более чем на 1 % (рис. 3, б). Стоит также отметить, что поверхностный слой образца, полученный с использованием технологии *MQL*, насыщен атомами углерода.

В работе [17] утверждается, что с увеличением температуры окисления никелевого сплава *Inconel 718* скорость окисления, толщина внешней окалины и внутренняя зона окисления увеличивались. В процессе окисления формируется слой Cr_2O_3 с образованием TiO_2 на самой поверхности [17, 18], причем количество TiO_2 увеличивается с повышением температуры [17]. Повышение концентрации Nb на поверхности наших образцов (рис. 3) согласуется с результатами работ [17, 18], где отмечается образование интерметаллической фазы Ni_3Nb на границе раздела оксид–сплав за счет диффузии атомов Nb. Таким образом, можно предположить аналогичность механизмов окисления. В целом полученные результаты подтверждают эффективность охлаждающей функции технологии *CAMQL*.

Одним из фундаментальных параметров энергетического состояния поверхностного слоя является работа выхода электрона (РВЭ), которая определяется разницей между минимальной энергией, необходимой для перемещения электрона из объема твердого тела, и энергией Ферми.

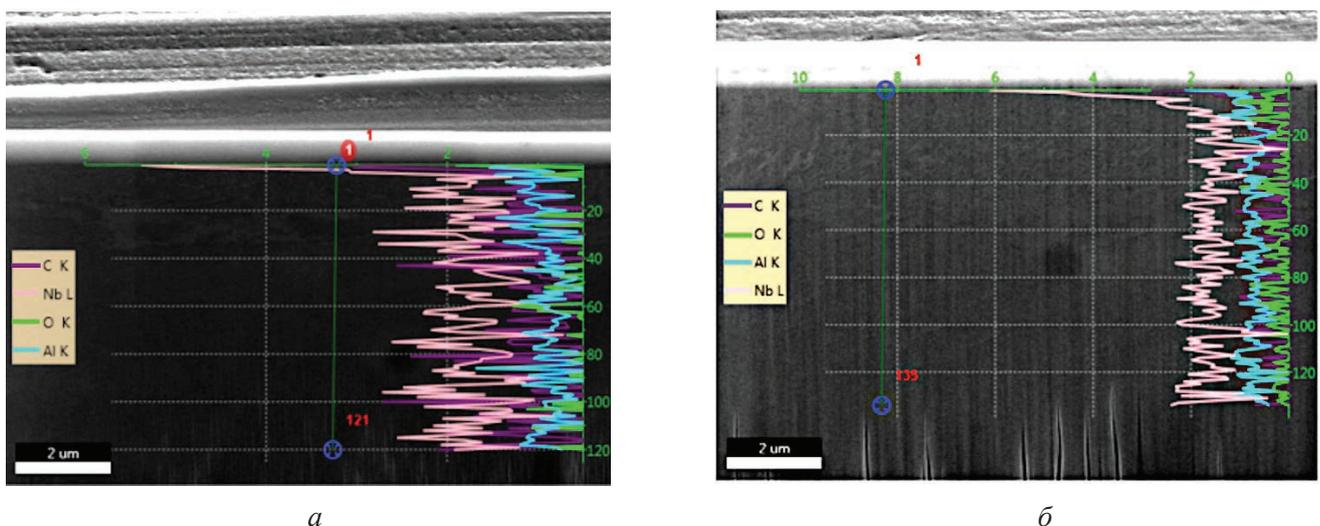


Рис. 3. Микрорентгеноспектральный анализ подповерхностного слоя после шлифования:

а – *MQL* с наночастицами; б – *CAMQL* с наночастицами

Fig. 3. EDS spectra of the subsurface layer of post-grinding:

а – nanoparticle jet *MQL*; б – nanoparticle jet *CAMQL*

Знание действительной величины РВЭ дает возможность с большой точностью определить поверхностную энергию металлов и других твердых тел и, таким образом, проследить за изменением состояния их поверхностных слоев.

Многочисленные исследования показали, что функция РВЭ неразрывно связана со многими механическими свойствами металлов [19–21]. Например, модуль упругости чистых металлов коррелирует отношение шестой степени с функцией РВЭ [20]. *Y. Zhou, J.Q. Lu* с соавторами экспериментально доказано влияние деформации на РВЭ: упругие деформации вызывают рост РВЭ, а в области пластического деформирования работа выхода уменьшается [22]. Функция работы влияет на адгезионную активность поверхности, следовательно, оказывает влияние на трение, трибологические процессы и др. [23].

Таким образом, функция РВЭ может быть использована для прогнозирования и оценки механических свойств металлов. Кроме того, знание общей РВЭ дает дополнительную информацию о поверхностных слоях материалов, что позволит управлять адаптацией материалов и их свойств.

Известно выражение, которое связывает РВЭ исследуемого образца через значение КРП, измеренное методом зонда Кельвина:

$$\varphi = \frac{W_1 - W_2}{-e},$$

где φ – значение КРП; W_1 – РВЭ образца; W_2 – РВЭ материала зонда; e – заряд электрона.

С учетом того что РВЭ зонда W_2 при измерениях является величиной постоянной, пространственное распределение КРП φ по поверхности образца имеет аналогичную тенденцию распределения значений РВЭ по поверхности образца W_1 .

Результаты измерения поверхности, полученной после шлифования с использованием технологии *MQL*, показывают, что наблюдается довольно контрастный микрорельеф с характерными рисками от абразивных зерен, и КРП изменяется в пределах от -50 до 50 мВ с максимальным количеством значений около нуля (рис. 4, а), т. е. РВЭ образца приблизительно равна РВЭ зонда. Зонд покрыт пленкой из золота, РВЭ которого $5,1$ эВ [24].

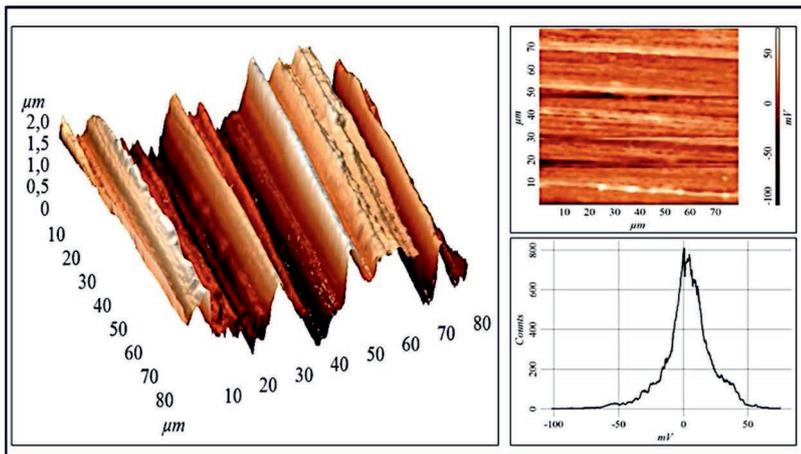
Применение технологии *CAMQL* обеспечивает более равномерный микрорельеф образца, в положительную область сдвигается КРП с максимумом значений в районе 100 мВ (рис. 4, б). Таким образом, РВЭ поверхности увеличивается в интервале $0,1 \dots 0,2$ эВ. Разница в значениях РВЭ исследуемых образцов может заключаться в механизме окисления, изложенном выше. Если принимать во внимание гипотезу, что с увеличением температуры шлифования на обрабатываемой поверхности повышается количество оксида титана TiO_2 , который имеет более низкое значение РВЭ ($4,7$ эВ), то общий уровень РВЭ поверхности должен понижаться.

Кроме того, в работе [23] при исследовании процессов трения доказано, что поверхности с более высокими значениями РВЭ лучше удерживают смазку и образуют устойчивые трибопленки с низким коэффициентом трения. Таким образом, результаты исследования по оценке РВЭ показывают более благоприятное состояние поверхности, полученной после шлифования с технологией *CAMQL*.

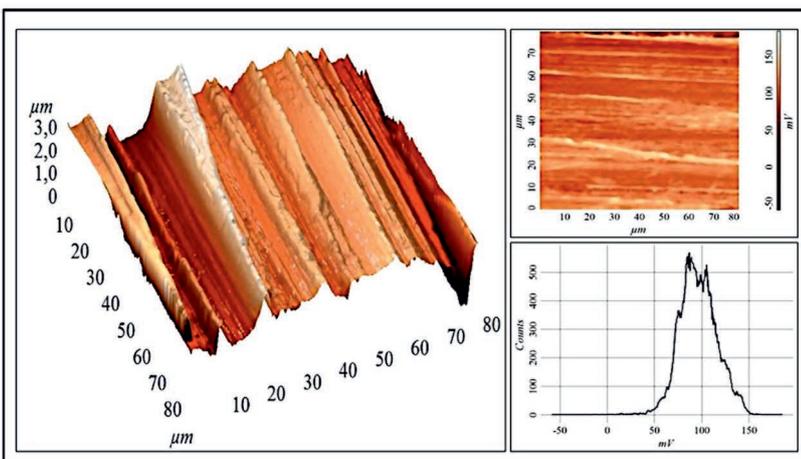
Резюмируя итоги исследований состояния тонкого поверхностного слоя, можно заключить, что при использовании технологии *CAMQL* изменяется температура контактного взаимодействия, происходит трансформация свойств поверхностного слоя за счет видоизменения механизма окисления, что положительно воздействует на процессы трения и адгезии. Поэтому применение технологий микродозирования смазочной среды является перспективным направлением, и с учетом дальнейших работ по оптимизации режимов и составов сможет достойно конкурировать с традиционным способом подачи СОЖ при шлифовании труднообрабатываемых материалов.

Выводы

1. Установлено, что наилучшие результаты при оценке составляющих силы резания в рамках варьируемых в работе значений обеспечиваются с режимом дозирования смазочной среды – 30 мл/ч, величиной воздушного потока для технологии *CAMQL* – 12 м³/ч, концентрацией наночастиц Al_2O_3 в смазочных композициях на основе соевого масла – $0,4$ мас. %.



а



б

Рис. 4. Микрорельеф поверхности и контактная разность потенциалов после шлифования:

а – MQL с наночастицами; б – CAMQL с наночастицами

Fig. 4. Surface microrelief and contact potential difference of post-grinding:

а – nanoparticle jet MQL; б – nanoparticle jet CAMQL

2. Эксплуатационные испытания показали, что относительно шлифования без СОЖ силы резания практически одинаковые для случая MQL (соевое масло); меньше на 20 % – CAMQL (соевое масло); снижаются на 30 % при добавлении наночастиц в составы и почти равные как для технологии MQL, так и CAMQL. Шероховатость обработанной поверхности уменьшается в среднем в 1,5 раза.

3. Исследования состояния тонкого поверхностного слоя после шлифования показали, что применение технологии CAMQL (с наночастицами) обеспечивает снижение окисления поверхности и улучшение ее свойств, вероятнее

всего, за счет понижения температуры шлифования, что в итоге положительно воздействует на процессы трения и адгезии.

4. При использовании составов с наночастицами Al_2O_3 наблюдается уменьшение следов адгезионного взаимодействия на обработанной поверхности, особенно при шлифовании с использованием технологии CAMQL.

Список литературы

1. Role of frozen lubricant film on tribological behaviour and wear mechanisms in grinding / E. García, D. Méresse, I. Pombo, M. Dubar, J. Sánchez // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 82. – P. 1017–1027. – DOI: 10.1007/s00170-015-7397-3.

2. Reddy P.P., Ghosh A. Some critical issues in cryo-grinding by a vitrified bonded alumina wheel using liquid nitrogen jet // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 229. – P. 329–337. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.040.

3. Nguyen T. An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140. – P. 224–230. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00714-3.

4. Choi H.Z., Lee S.W., Jeong H.D. The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 127. – P. 155–158. – DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00117-6.

5. Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube / A. Saberi, A.R. Rahimi, H. Parsa, M. Ashrafijou, F. Rabiei // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 131. – P. 728–738. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.104.

6. Lee P.A. Study on thermal characteristics of micro-scale grinding process using nanofluid minimum quantity lubrication (MQL) // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2015. – Vol. 16, N 9. – P. 1899–1909. – DOI: 10.1007/s12541-015-0247-2.

7. Shen B. Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding // Tribology Transactions. – 2008. – Vol. 51. – P. 730–737. – DOI: 10.1080/10402000802071277.



8. Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R. Mechanism of nanoparticles functioning and effects in machining processes: a review // *Materials Today: Proceedings*. – 2015. – Vol. 2, iss. 4–5. – P. 3539–3544. – DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.331.

9. Nanofluids as potential solution for minimum quantity lubrication: a review / R.R. Srikant, M.M.S. Prasad, M. Amrita, A.V. Sitaramaraju, P.V. Krishna // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2014. – Vol. 228, iss. 1. – P. 3–20. – DOI: 10.1177/0954405413497939.

10. Vasu V., Pradeep Kumar Reddy G. Effect of minimum quantity lubrication with Al_2O_3 nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining Inconel 600 alloy // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*. – 2011. – Vol. 225, iss. 1. – P. 3–16. – DOI: 10.1177/1740349911427520.

11. Крутикова А.А., Митрофанов А.П., Паршева К.А. Применение технологии подачи минимального количества смазки в охлажденном воздушном потоке при шлифовании жаропрочного сплава // *Технология металлов*. – 2019. – № 8. – С. 9–15. – DOI: 10.31044/1684-2499-2019-8-0-9-15.

12. Temperature field model and experimental verification on cryogenic air nanofluid minimum quantity lubrication grinding / J. Zhang, C. Li, Y. Zhang, M. Yang, D. Jia, Y. Hou, R. Li // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97. – P. 209–228. – DOI: 10.1007/s00170-018-1936-7.

13. Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil / Y. Zhang, C. Li, D. Jia, D. Zhang, X. Zhang // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Vol. 87. – P. 930–940. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.027.

14. An experimental study on micro-grinding process with nanofluid minimum quantity lubrication (MQL) / P.H. Lee, J.S. Nam, C. Li, S.W. Lee // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2012. – Vol. 13, iss. 3. – P. 331–338. – DOI: 10.1007/s12541-012-0042-2.

15. Environment-friendly technological advancements to enhance the sustainability in surface grinding –

a review / D. Manu, S.S. Vishal, S.D. Jasminder, S.G. Simranpreet // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 197. – P. 218–231. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.280.

16. Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding / D. Zhang, C. Li, D. Jia, Y. Zhang, X. Zhang // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2015. – Vol. 28, iss. 2. – P. 570–581. – DOI: 10.1016/j.cja.2014.12.035.

17. Cyclic oxidation behavior of IN 718 superalloy in air at high temperatures / K.A. Al-hatab, M.A. Al-bukhaiti, U. Krupp, M. Kantehm // *Oxidation of Metals*. – 2011. – Vol. 75, iss. 3–4. – P. 209–228. – DOI: 10.1007/s11085-010-9230-6.

18. SEM-EDS and XPS studies of the high temperature oxidation behaviour of Inconel 718 / F. De-launay, C. Berthier, M. Lenglet, J.M. Lameille // *Mikrochimica Acta*. – 2000. – Vol. 132, iss. 2–4. – P. 337–343. – DOI: 10.1007/s006040050027.

19. Li W. Influences of tensile strain and strain rate on the electron work function of metals and alloys // *Scripta Materialia*. – 2006. – Vol. 54, iss. 5. – P. 921–924. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.10.064.

20. Hua G., Li D. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 99, iss. 4. – P. 041907. – DOI: 10.1063/1.3614475.

21. Lu H. Electron work function – a promising guiding parameter for material design / H. Lu, Z. Liu, X. Yan, D. Li, L. Parent, H. Tian // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 1–11. – DOI: 10.1038/srep24366.

22. Zhou Y., Lu J.Q., Qin W.G. Change in the electronic work function under different loading conditions // *Materials Chemistry and Physics*. – 2009. – Vol. 118. – P. 12–14. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2009.07.062.

23. Shiyi L., Hao L., Li D.Y. The relationship between the electron work function and friction behavior of passive alloys under different conditions // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 351. – P. 316–319. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.05.125.

24. Wang J., Wang S.Q. Surface energy and work function of fcc and bcc crystals: density functional study // *Surface Science*. – 2014. – Vol. 630. – P. 216–224. – DOI: 10.1016/j.susc.2014.08.017.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Investigation of the Technology of Microdosed supply of Lubricant Compositions with Nanoparticles during Grinding of Heat-Resistant Ni-based with Additional Air Cooling

Artem Mitrofanov^{a,*}, Vladimir Nosenko^b

Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Volgograd State Technical University, 42a Engelsa Street, Volzhsky, 404121, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-1829-322X>, greenmap@yandex.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>, vladim.nosenko2014@ya.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 September 2019

Revised: 06 October 2019

Accepted: 15 November 2019

Available online: 15 December 2018

Keywords:

Minimum quantity lubrication

Grinding

Nanoparticles

Soybean oil

Cold air

Ni-based alloy

Cutting forces

Quality and surface properties

Funding

The reported study was funded by RFBR and the government of Volgograd region according to the research project № 18-48-343004 p_мол_a.

ABSTRACT

Introduction. In terms of environmental issues, the most significant problem in the metal finishing process is the use of lubricating cooling fluids (coolant). As an alternative of coolant using in the world practice are integrating an environmentally determined engineering of minimum lubrication (*MQL – minimum quantity lubrication*). Though the use of MQL process in the abrasion with the highest contact temperatures is not effective enough. Due to this a set of measures has been suggested in the scientific community such as, the additional cooling action of the cutting area by cold air (*CAMQL – cold air with minimum quantity lubrication*). As part of our paper the researches of using these methods, both separately and in synthesis, in order to assessment of capability for increasing the *MQL* efficiency when grinding Ni-based alloy are carried out. **The purpose of the work** is to quantify the influence of the *MQL* and *CAMQL* input processes on the operational factors of the grinding process and the properties of a thin surface. Vegetable soy oil is used as a lubricant, including the addition of Al_2O_3 nanoparticles. **Research methods.** The surface roughness is controlled with *Mitutoyo Surfest SJ-410 profilometr*. Component cutting forces are measured using a six-component force-measuring complex *Amti MC36-1000*. Elemental analysis and surface morphology rating are carried out using a FEI Versa 3D LoVac dual-beam raster electron microscope with an X-ray microanalysis attachment. The contact potential difference is measured by atomic-force microscopy using the Kelvin's probe method. **Results and discussion.** The better application conditions for *MQL* and *CAMQL* are established, these are the dosing regimens of lubricating at 30 ml/h and the air low range for *CAMQL* equals to 12 m³/h. The measurement results of cutting forces showed the using of soy oil lubricant only is more effective for *CAMQL*. On addition of Al_2O_3 nanoparticles with an optimal concentration of 0.4 wt. % there is observed the dramatic decline of the cutting forces, in particular P_y component (by 30 % relative to grinding process without coolant), and the force values are almost the same when using both *MQL* and *CAMQL*. The machined surface roughness is reduced averagely 1.5 times. While using lubricant compositions with nanoparticles, there is a tendency to lower the surface roughness values when grinding with *CAMQL*. The states research of a thin surface layer after grinding process showed the use of *CAMQL*, regardless of the lubricant type, provides reduction of surface oxidation and improvement of its properties. When using compositions with Al_2O_3 nanoparticles, the decrease of adhesive interaction traces of machine surface is observed.

For citation: Mitrofanov A.P., Nosenko V.A. Investigation of the technology of microdosed supply of lubricant compositions with nanoparticles during grinding of heat-resistant Ni-based with additional air cooling. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 6–18. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-6-18. (In Russian).

References

1. García E., Méresse D., Pombo I., Dubar M., Sánchez J. Role of frozen lubricant film on tribological behaviour and wear mechanisms in grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 1017–1027. DOI: 10.1007/s00170-015-7397-3.

* Corresponding author

Mitrofanov Artem P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Volgograd State Technical
 University, 42a Engelsa Street,
 Volzhsky, 404121, Russian Federation
 Tel.: +7 (8443) 55-69-35, e-mail: greenmap@yandex.ru

2. Reddy P.P., Ghosh A. Some critical issues in cryo-grinding by a vitrified bonded alumina wheel using liquid nitrogen jet. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 229, pp. 329–337. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.040.
3. Nguyen T. An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 140, pp. 224–230. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00714-3.
4. Choi H.Z., Lee S.W., Jeong H.D. The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 127, pp. 155–158. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00117-6.
5. Saberi A., Rahimi A.R., Parsa H., Ashrafijou M., Rabiei F. Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 131, pp. 728–738. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.104.
6. Lee P.A. Study on thermal characteristics of micro-scale grinding process using nanofluid minimum quantity lubrication (MQL). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 1899–1909. DOI: 10.1007/s12541-015-0247-2.
7. Shen B. Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding. *Tribology Transactions*, 2008, vol. 51, pp. 730–737. DOI: 10.1080/10402000802071277.
8. Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R. Mechanism of nanoparticles functioning and effects in machining processes: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, iss. 4–5, pp. 3539–3544. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.331.
9. Srikant R.R., Prasad M.M.S., Amrita M., Sitaramaraju A.V., Krishna P.V. Nanofluids as potential solution for minimum quantity lubrication: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, vol. 228, iss. 1, pp. 3–20. DOI: 10.1177/0954405413497939.
10. Vasu V., Pradeep Kumar Reddy G. Effect of minimum quantity lubrication with Al₂O₃ nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining Inconel 600 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 2011, vol. 225, iss. 1, pp. 3–16. DOI: 10.1177/1740349911427520.
11. Krutikova A.A., Mitrofanov A.P., Parsheva K.A. Primenenie tekhnologii podachi minimal'nogo kolichestva smazki v okhlazhdennom vozdushnom potoke pri shlifovanii zharoprochnogo splava [Application of technology for supply of minimum lubricant amount in cooled air flow during heat-resistant alloy grinding]. *Tekhnologiya metallov = Technology of Metals*, 2019, no. 8, pp. 9–15. DOI: 10.31044/1684-2499-2019-8-0-9-15.
12. Zhang J., Li C., Zhang Y., Yang M., Jia D., Hou Y., Li R. Temperature field model and experimental verification on cryogenic air nanofluid minimum quantity lubrication grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, pp. 209–228. DOI: 10.1007/s00170-018-1936-7.
13. Zhang Y., Li C., Jia D., Zhang D., Zhang X. Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 87, pp. 930–940. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.027.
14. Lee P.H., Nam J.S., Li C., Lee S.W. An experimental study on micro-grinding process with nanofluid minimum quantity lubrication (MQL). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, iss. 3, pp. 331–338. DOI: 10.1007/s12541-012-0042-2.
15. Manu D., Vishal S. S., Jasminder S.D., Simranpreet S. G. Environment-Friendly Technological Advancements to Enhance the Sustainability in Surface Grinding- A Review. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 197, pp. 218–231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.280.
16. Zhang D., Li C., Jia D., Zhang Y., Zhang X. Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, vol. 28, iss. 2, pp. 570–581. DOI: 10.1016/j.cja.2014.12.035.
17. Al-hatab K.A., Al-bukhaiti M.A., Krupp U., Kantehm M. Cyclic oxidation behavior of IN 718 superalloy in air at high temperatures. *Oxidation of Metals*, 2011, vol. 75, iss. 3–4, pp. 209–228. DOI: 10.1007/s11085-010-9230-6.
18. Delaunay F., Berthier C., Lenglet M., Lameille J.M. SEM-EDS and XPS studies of the high temperature oxidation behaviour of Inconel 718. *Mikrochimica Acta*, 2000, vol. 132, iss. 2–4, pp. 337–343. DOI: 10.1007/s006040050027.
19. Li W. Influences of tensile strain and strain rate on the electron work function of metals and alloys. *Scripta Materialia*, 2006, vol. 54, iss. 5, pp. 921–924. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.10.064.
20. Hua G., Li D. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals. *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 99, iss. 4, p. 041907. DOI: 10.1063/1.3614475.

21. Lu H., Liu Z., Yan X., Li D., Parent L., Tian H. Electron work function – a promising guiding parameter for material design. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 1–11. DOI: 10.1038/srep24366.
22. Zhou Y., Lu J.Q., Qin W.G. Change in the electronic work function under different loading conditions. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, vol. 118, pp. 12–14. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2009.07.062.
23. Shiyi L., Hao L., Li D.Y. The relationship between the electron work function and friction behavior of passive alloys under different conditions. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 351, pp. 316–319. DOI: 10.1016/j.apusc.2015.05.125.
24. Wang J., Wang S.Q. Surface energy and work function of fcc and bcc crystals: density functional study. *Surface Science*, 2014, vol. 630, pp. 216–224. DOI: 10.1016/j.susc.2014.08.017.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).