



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование влияния масляных СОТС с улучшенными трибологическими свойствами на силы резания и шероховатость обработанных поверхностей

Эрвин Умеров^{1, 2, а, *}, Владимир Скакун^{1, 2, б}, Руслан Джемалядинов^{1, 2, с}, Юрий Егоров^{2, д}

¹ Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, пер. Учебный, 8, г. Симферополь, 295015, Россия

² Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, пр. Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-3477-2036>, Ervin777@yandex.ru; ^б <https://orcid.org/0000-0003-0656-7852>, vladimir.skakun.92@list.ru;

^с <https://orcid.org/0000-0003-3319-3542>, rus.dzhemalyadinov@mail.ru; ^д <https://orcid.org/0000-0003-4990-9998>, yuriyegorov@cftuv.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.01

История статьи:

Поступила: 16 октября 2024

Рецензирование: 26 октября 2024

Принята к печати: 21 ноября 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Смазочно-охлаждающие технологические средства

Коэффициент трения

Силы резания

Шероховатость

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-20013).

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из способов повышения эффективности процесса резания является разработка новых эффективных составов смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), которые позволяют снизить силу, а также температуру резания, увеличив при этом стойкость режущего инструмента и качество обработанной поверхности. Одним из путей решения данной проблемы является химическая активация СОТС присадками из наноглинистых минералов с минимальной стоимостью, большие запасы которых имеются в недрах земли. В связи с этим приводится теоретическое обоснование выбора данной присадки и ее влияние на трибологические свойства СОТС. **Цель работы.** Определить влияние масляных СОТС с присадками из наноглинистых минералов на снижение силы резания, а также повышение качества обработанной поверхности при сверлении коррозионно-стойкой стали. **Методы исследования.** На операции сверления проведены экспериментальные исследования, в процессе которых осуществлялась фиксация составляющих силы резания при помощи трехкомпонентного динамометра М-30-3-6к. Целью эксперимента было определение влияния масляных СОТС, содержащих присадки из наноглинистых минералов, на составляющую силы резания, а также шероховатость обработанной поверхности. С использованием математического моделирования была получена формула для расчета коэффициента трения в процессе сверления. **Результаты работы.** В процессе проведения экспериментальных исследований получены результаты, показывающие эффективность использования масляных СОТС с присадками из наноглинистых минералов. Получены экспериментальные данные коэффициента трения, составляющей силы резания, а также шероховатости обработанной поверхности при сверлении с использованием экспериментальной СОТС, подаваемой в зону резания. Результаты исследований показали эффективность применения модифицированной СОТС по сравнению с традиционными составами. **Выводы.** Модифицированная СОТС, в состав которой входит подсолнечное масло и присадки из наноглинистых минералов, позволяет значительно снизить коэффициент трения, силу резания, а также шероховатость обработанной поверхности, что открывает дальнейшую перспективу их использования в металлообрабатывающей промышленности.

Для цитирования: Исследование влияния масляных СОТС с улучшенными трибологическими свойствами на силы резания и шероховатость обработанных поверхностей / Эрвин Умеров, В.В. Скакун, Р.М. Джемалядинов, Ю.А. Егоров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 6–19. – DOI:10.17212/1994-6309-2025-27.1-6-19.

Введение

Развитие отечественного машиностроения – одна из приоритетных задач современного государства. В связи с этим актуально совершенствование уже существующих технологий, а также поиск новых решений, позволяющих в комплексе получить повышение качества и про-

изводительности процесса механической обработки при сохранении низкой себестоимости изготовления готового изделия.

Одним из возможных вариантов решения указанной задачи является разработка новых составов смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), сочетающих в себе высокие смазывающие и охлаждающие свойства. Требуется исследование их влияния на процесс механической обработки, что позволит открыть новые пути их эффективного применения. Одним из способов решения данной проблемы

*Адрес для переписки

Умеров Эрвин Джеватович, к.т.н., доцент

Крымский инженерно-педагогический университет им. Февзи Якубова, пер. Учебный, 8,

295015, г. Симферополь, Россия

Тел.: +7 978 832-72-92, e-mail: Ervin777@yandex.ru

является применение экологически безопасных СОТС на основе растительных масел. В свою очередь, получение таких СОТС должно быть экономически обосновано и не должно приводить к большим финансовым затратам при их изготовлении.

Основным действием масляных СОТС является смазочное, обеспечивающее необходимое качество обработанной поверхности, но по охлаждающим свойствам они уступают другим средствам. В подавляющем большинстве случаев на производстве применяют водорастворимые СОТС (эмульсии), которые за счет подачи достаточно большого объема снижают температуру в зоне резания путем конвективного теплообмена, но при этом уступают масляным по смазывающим свойствам.

Анализу способов активации и совершенствования СОТС, используемых при лезвийной обработке заготовок, посвящено значительное количество научных работ, авторы которых внесли большой вклад в область исследования механизма действия СОТС в процессе резания [1–4].

Активация СОТС реализуется путем добавления в них функциональных присадок, различающихся природой и химическим строением. В состав присадок входят различные активные органические компоненты: фосфор, хлор и сера. Эти элементы образуют защитные пленки на контактных поверхностях и способствуют предотвращению молекулярного сцепления материала инструмента и заготовки. Возможно также применение графита, порошков мягких металлов (дисульфид молибдена) и высокодисперсных порошков (серпентина), относящихся к наноструктурированным присадкам. Они позволяют снизить силу трения в зоне резания за счет антифрикционных свойств, путем увеличения количества опорных площадей контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Известны также химические соединения и присадки к СОТС, которые обладают канцерогенным действием и оказывают негативное влияние на человека и окружающую среду.

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что существующие методы и способы активации СОТС могут быть значительно доработаны. При этом создание новых масляных СОТС, имеющих низкую стоимость и обладающих эндотермическим (охлаждающим)

эффектом с улучшенными трибологическими (смазывающими) свойствами, также остается актуальным.

Решение поставленной задачи возможно путем добавления в состав масляных СОТС присадок, представляющих собой наноглинистые минералы. По своим физико-механическим свойствам эти минералы имеют сходство с такими присадками, как дисульфид молибдена, графит и серпентин.

Основное отличие рассматриваемых присадок заключается в способности к гидрорасклиниванию структурных пакетных слоев (в процессе их гидрирования), в результате чего обеспечивается гидросмазка между слоями, которая способствует повышению трибологической эффективности масляных СОТС [5].

Таким образом, применение модифицированных СОТС с использованием в качестве модификатора трения наноглинистых минералов может положительно повлиять на процесс резания труднообрабатываемых материалов и нержавеющей сталей с присущей им низкой теплопроводностью [6, 7].

Оптимальные режимы резания [8], качество применяемых СОТС и способ их подачи [9, 10] влияют на процесс пластической деформации, приводя к снижению температуры и силы резания, а также к повышению качества обработанной поверхности и стойкости инструмента [11–15].

Следовательно, возникает необходимость в теоретических исследованиях, в проведении лабораторных и практических испытаний, направленных на разработку модифицированных СОТС с использованием в качестве модификатора трения присадок из наноглинистых минералов (ПНМ), сочетающих в себе помимо высокого смазывающего также и охлаждающее действие, необходимое при обработке труднообрабатываемых материалов и нержавеющей сталей.

Цель исследований: определить влияние масляных СОТС с присадками из наноглинистых минералов на снижение силы резания и повышение качества обработанной поверхности при сверлении нержавеющей стали.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

1) обосновать выбор присадки к масляным СОТС для повышения их трибологической эффективности;

2) теоретически и экспериментально подтвердить эффективность применения в качестве модификатора трения к масляным СОТС присадок из наноглинистых минералов и их влияние на повышение трибологических свойств;

3) на основе современных положений теории резания произвести анализ влияния присадок из наноглинистых минералов, присутствующих в масляных СОТС в качестве модификатора трения, на составляющие силы резания и шероховатость обработанной поверхности.

Методика исследований

При лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов, а также нержавеющей стали с использованием различных по составу СОТС от подаваемой в зону резания технологической среды обычно требуют как смазывающего, так и охлаждающего действия. Однако, как правило, повышение смазывающего эффекта неуклонно ведет к ухудшению охлаждающего действия таких СОТС. Это обстоятельство побуждает к поиску альтернативных решений, в результате которых полученные СОТС будут обладать высокими как смазывающими, так и охлаждающими свойствами.

На основании вышеизложенного появилась необходимость проведения экспериментальных исследований, направленных на разработку модифицированных масляных СОТС с применением ПНМ в качестве основного модифицирующего элемента, с целью уменьшения затрат энергии в процессе резания, повышения качества обработанной детали и ресурса инструмента.

Использование ПНМ имеет ряд преимуществ. Например, они являются природными ископаемыми и находятся в недрах земли в большом количестве, имея при этом минимальную стоимость. Одним из видов наноглинистых минералов является бентонит, в основе которого лежит монтмориллонит (нанодисперсный силикат в виде листовой структуры).

По своим физико-химическим свойствам указанные материалы имеют положительные особенности, такие как возможность гидрорасклинивания структурных пакетных слоев при гидрировании, что обеспечивает гидросмазку между слоями, способствуя увеличению трибологической эффективности таких СОТС.

Описанное явление отличает трибологические свойства монтмориллонита относительно модификаторов трения, названных выше.

При гидрировании данной присадки, по сравнению с вышеописанными модификаторами трения, за счет расклинивающего действия поверхностно сорбированной воды трение между пакетами минерала переходит из сухого в жидкостное либо граничное трение. Гидрированные частицы минерала при попадании в контактную зону инструмента и заготовки вместе с масляными СОТС выполняют функцию «наноразмерных подшипников скольжения» [16, 17], которые позволяют снизить вероятность возникновения адгезионного износа инструмента.

Температура, достигнутая в контактной зоне инструмента и заготовки, действует на содержащиеся в масляных СОТС поверхностно сорбированные водой пакеты ПНМ, приводя, в свою очередь, к испарению влаги и обеспечивая эндотермический эффект. Одной из особенностей наноглинистых минералов является то, что в процессе испарения выделенные пары остаются в системе, а при снижении температуры выделенный пар конденсируется, возвращаясь обратно в структуру.

В процессе резания труднообрабатываемых материалов, к которым в том числе относятся и нержавеющей стали, усовершенствование трибологических характеристик СОТС особенно актуально, поскольку при обработке таких материалов доступ СОТС в контактную зону затруднен.

Рассмотрим случай, когда применяется стандартное СОТС без присадок, препятствующих адгезионному схватыванию при обработке труднообрабатываемых материалов.

Вследствие высоких удельных нагрузок, присутствующих в процессе резания и действующих на контактные поверхности инструмента, происходит вытеснение СОТС и дальнейшее схватывание стружки с инструментальной основой.

Таким образом, возникают условия для адгезионного схватывания между передней поверхностью режущего инструмента и стружкой (рис. 1, а).

Во втором случае масляных СОТС с присадкой графита или дисульфида молибдена, попадая в контактную зону в процессе резания (рис. 1, б), будет противодействовать схватыванию стружки с режущим инструментом, тем самым улучшая

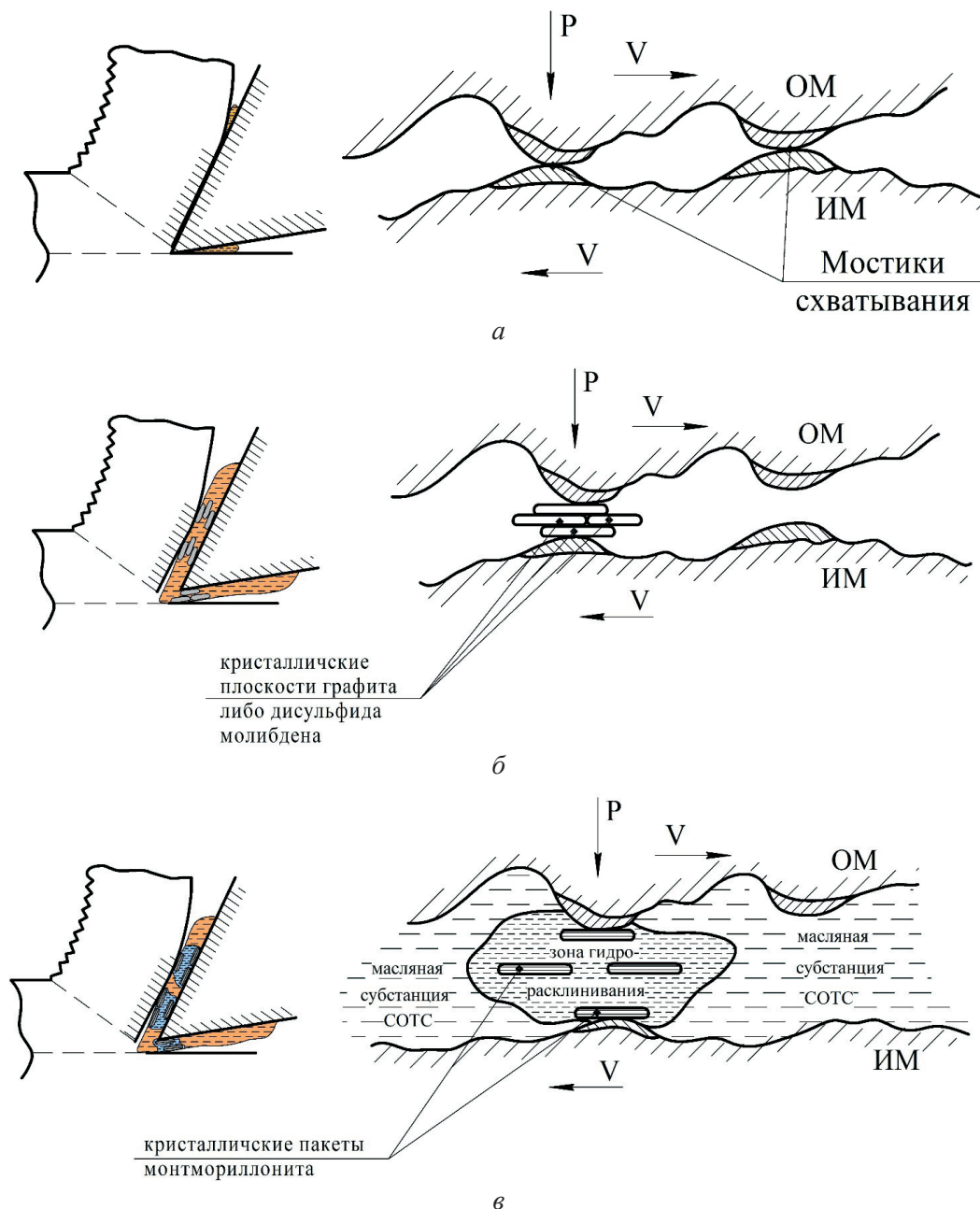


Рис. 1. Примеры реализации возможных контактных взаимодействий на передней поверхности режущего инструмента:

a – без подачи СОТС («сухое» резание); *б* – при наличии в масляном СОТС графита, который выступает в качестве присадки; *в* – при наличии в масляном СОТС присадки в виде гидрированного наноглинистого минерала; – область высокой локальной деформации; ОМ – обрабатываемый материал; *V* – линейная скорость; ИМ – инструментальный материал

Fig. 1. Examples of possible contact interactions on the rake face of a cutting tool:
a – without MWF feeding (“dry” cutting); *б* – with graphite in the oil-based MWF, acting as an additive; *в* – with an additive of a hydrogenated nanoclay mineral in the oil-based MWF; – the area of high local deformation; WM – work material; *V* – linear velocity; TM – tool material

условия трения в зоне резания. Это может достигаться за счет недопущения адгезионного схватывания пакетами слоев графита или дисульфида молибдена между собой.

При условии схожести кристаллических решеток графита или дисульфида молибдена и наноглинистых минералов в первом случае возможен сдвиг слоев, который происходит «всухую»,

а во втором случае создаются условия жидкостного трения при сопровождении гидрорасклинивания (рис. 1, в), что непосредственно влияет на трибологические свойства СОТС.

Для оценки термодинамических преобразований ПНМ, которые могут происходить в масляном СОТС при обработке материалов резанием, проведем анализ их поведения при гидратации и дегидратации. Данная присадка имеет кристаллическую решетку, состоящую из трех слоев и образующую пакеты с отрицательным зарядом, которые создают отгаливающие силы, обеспечивая при этом расклинивающий эффект [5].

Упомянутые ранее наноглинистые минералы обладают термодинамическими свойствами, и это делает возможным их использование в виде присадок к масляным СОТС.

В работе [18] приведен подробный термический анализ монтмориллонита с выделением температурного диапазона (80...220 °С), при котором проявляется эндотермический (телопоглощающий) эффект. В начале диапазона происходит удаление адсорбционного слоя воды, после чего с поверхности минерала выводится межпакетная вода. При увеличении температуры до 600 °С происходит полное разрушение кристаллической решетки (спекание) минерала, вызванное удалением структурного слоя воды.

Известно, что в процессе резания при небольших контактных нагрузках происходит граничное трение [19], а при интенсивной пластической деформации наблюдается уже «схватывание» стружки с передней поверхностью инструмента.

Для оценки эффективности описанной выше ПНМ в составе масляных СОТС были проведены лабораторные испытания по определению эмпирического коэффициента трения в условиях, приближенных к процессу сверления.

В работах [20, 21] описаны различные методы определения коэффициента трения смазочных материалов, в которых указано, что не всегда можно произвести оценку фактического коэффициента трения с использованием определенного метода механической обработки и с присущей каждому из методов индивидуальной особенностью. В свою очередь, широко используемая методика по определению коэффициента трения на четырехшариковой машине не позволяет воспроизвести имитацию процесса трения,

образованного, например, в контактной зоне режущего инструмента с заготовкой при сверлении.

Экспериментальная оценка эффективности разработанного СОТС на масляной основе с использованием в качестве модификатора трения ПНМ, а также оценка его трибологических свойств реализовывалась при использовании методики определения коэффициента трения «верчение конуса по конусу» на радиально-сверлильном станке 2К522.

Экспериментальный стенд выступал в качестве трибометра, позволяющего определять эмпирический коэффициент трения в условиях, приближенных к процессу сверления. В качестве индентора было использовано спиральное сверло из стали Р6М5 с измененной геометрией режущей кромки (рис. 2). Это обеспечивало процесс трения индентора (сверла) о коническую поверхность контртела (заготовки).

В процессе исследований на столе станка устанавливался динамометр трехкомпонентный М-30-3-6к, который позволяет регистрировать как осевую силу, так и крутящий момент. На динамометре при помощи фланца и трехкулачкового патрона закреплялась обрабатываемая заготовка из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т

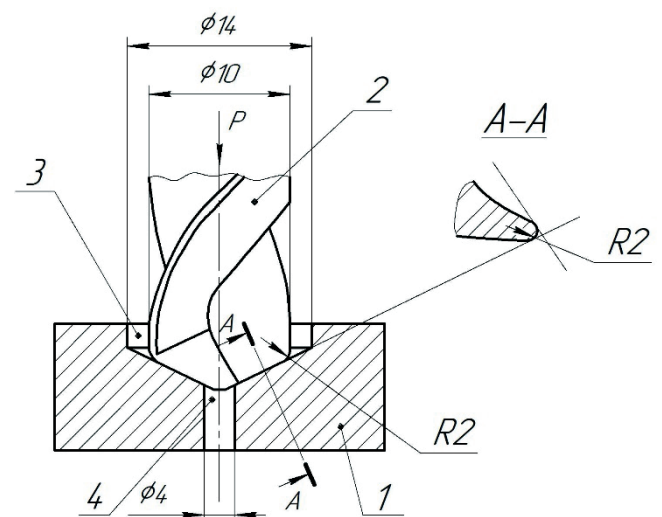


Рис. 2. Геометрия режущей кромки модифицированного сверла (индентора):

1 – контртело (заготовка); 2 – индентор (спиральное сверло); 3 – паз для подачи в зону трения СОТС; 4 – сквозное отверстие для удаления СОТС

Fig. 2. Geometry of the cutting edge of a modified drill (indenter):

1 – counterbody (workpiece); 2 – indenter (spiral drill); 3 – circular groove for supplying to the cutting zone; 4 – through-hole for removing MWF

с заранее полученным отверстием. В роли индентора выступало спиральное сверло диаметром $D = 10$ мм с углом заточки $2\varphi = 118^\circ$, изготовленное из быстрорежущей стали Р6М5 со скруглениями на режущей кромке (рис. 2).

Регистрация значений осевой силы и крутящего момента осуществлялась при помощи динамометра трехкомпонентного М-30-3-6к, сигнал от которого через усилитель и аналого-цифровой преобразователь передавался на персональный компьютер для дальнейшего построения графической зависимости.

На рис. 6 показан общий вид экспериментального стенда. Для предотвращения попадания СОТС на измерительное оборудование в процессе исследований применялся специальный защитный экран.

Последовательность выполнения лабораторных испытаний была следующей. На динамометре при помощи трехкулачкового патрона и фланца закреплялось контртело 4. Индентор 1 закреплялся в шпинделе станка при помощи патрона. Далее после запуска станка с последующей подачей испытуемого модифицированного СОТС через паз 2 в контактную зону постепенно создавалась осевая нагрузка на контртело с требуемым значением P_0 и дальнейшей фиксацией момента трения. Частота вращения шпинделя составляла 500 об/мин с осевой нагрузкой на индентор $P_0 = 2000$ Н.

Для сравнения эффективности были использованы следующие составы СОТС: растительное масло (подсолнечное), промышленное масло И-20А, растительное масло (подсолнечное) с ПНМ и промышленное масло И-20А с ПНМ. Постоянная подача СОТС составляла 0,5 л/мин.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований по определению эмпирического коэффициента трения с использованием описанной выше методики.

В процессе трения вращающегося индентора (сверла) относительно неподвижного контртела оптимальным является использование не силы трения, а момента трения $M_{тр}$. В свою очередь, сила сопротивления перемещению индентора (сверла) относительно поверхности контртела

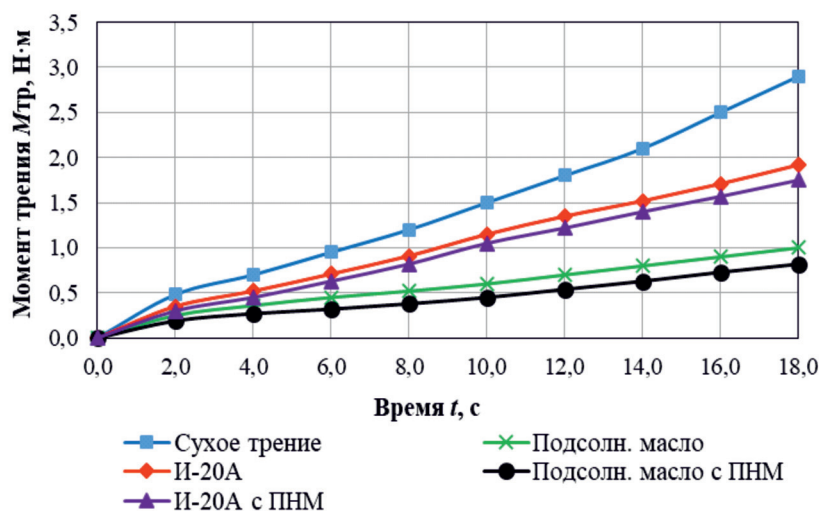


Рис. 3. Значения момента трения в среде различных СОТС

Fig. 3. Friction torque values in various MWF environments

является распределенной силой, которая направлена противоположно вектору скорости рассматриваемого тела.

Согласно расчетной схеме (рис. 4) сила трения $F_{тр}$ есть равнодействующая сила, которую можно определить по правилу нахождения равнодействующих параллельных распределенных сил. Определим ее величину и точку приложения, расположенную в центре линии контакта l сверла и заготовки.

Из схемы узла трения следует, что на индентор (сверло) действует пара сил $\{-F_{тр}; F_{тр}\}$ с моментом

$$M_{тр} = \frac{F_{тр}(D + d_0)}{2}, \quad (1)$$

где D — диаметр индентора (сверла); d_0 — диаметр отверстия в контртеле, или

$$F_{тр} = \frac{2M_{тр}}{D + d_0}. \quad (2)$$

Для рассматриваемого узла формула (2) связывает между собой момент и силу трения.

Нормальная сила P_N , действующая по контактной поверхности инструмента, есть произведение проекции нормальной силы P_N на синус угла между силами. Используя условие равновесия с учетом силы нормального давления на поверхности индентора (сверла) P_N , контактирующей с контртелом, получим

$$P_N = \frac{P_0 \sin \varphi}{2}, \quad (3)$$

где P_0 — осевая сила, Н.

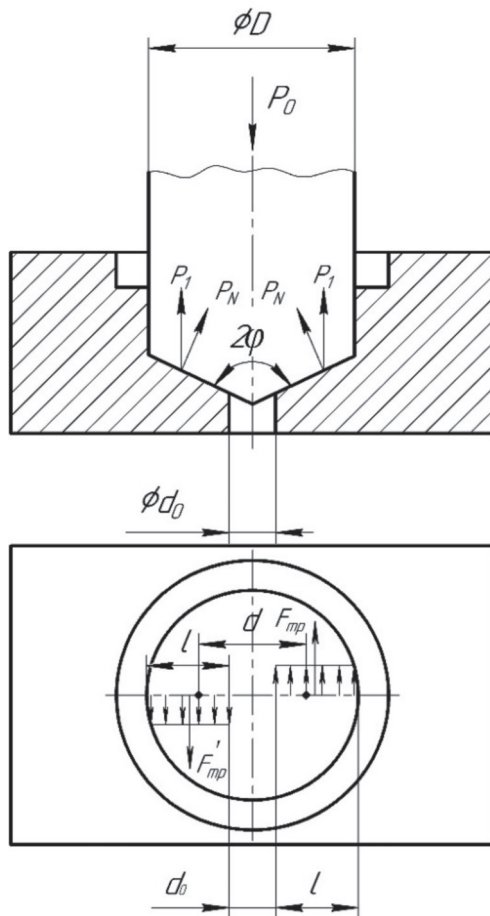


Рис. 4. Расчетная схема рассматриваемого узла трения:

2φ – угол при вершине сверла, град;
 $F_{тр}$ – сила трения, Н; P_0 – осевая сила, Н

Fig. 4. Design scheme of the analyzed friction pair:

2φ – drill apex angle, deg; F_{fr} – friction force, Н; P_0 – axial force, Н

Согласно закону Амонтона – Кулона, нормальная сила P_N связана с силой трения $F_{тр}$, которую можно определить следующим уравнением:

$$F_{тр} = \mu P_N = \frac{\mu P_0 \sin \varphi}{2}, \quad (4)$$

где μ – эмпирический коэффициент трения.

После преобразований получим

$$\mu = \frac{4M_{тр}}{(D + d_0) \cdot P_0 \sin \varphi}. \quad (5)$$

Далее, используя максимальные значения момента трения, а также прикладываемой осевой силы, определяется эмпирический коэффициент трения для рассматриваемого случая.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты момента трения $M_{тр}$ при постоянной осевой нагрузке $P_0 = 2000$ Н в среде различных составов СОТС представлены графически на рис. 5.

Проведя анализ полученных данных (рис. 5), можно сделать вывод, что максимальное значение эмпирического коэффициента трения было получено при условии «сухого» трения, без использования СОТС ($\mu = 0,48$). Применение ПНМ в качестве модификатора СОТС позволяет снизить эмпирический коэффициент трения, где наибольший эффект от применения данной присадки проявляется на подсолнечном масле ($\mu = 0,11$) по сравнению с СОТС на минеральной основе ($\mu = 0,19$). Это говорит о том, что масляное СОТС на основе подсолнечного масла с ПНМ обладает улучшенной смазывающей способностью, обеспечивая тем самым граничное трение (возможно, даже жидкостное).

Таким образом, подсолнечное масло, модифицированное ПНМ, является наиболее эффективным по сравнению с подсолнечным маслом без ПНМ, минеральным маслом И-20А без ПНМ, а также минеральным И-20А, модифицированным ПНМ, что свидетельствует о высокой смазывающей и несущей способности экспериментального СОТС.

Определение значений эмпирического коэффициента трения с использованием предложенной методики позволяет дать количественную оценку трибологическим свойствам модифицированных СОТС и получить более полную ин-

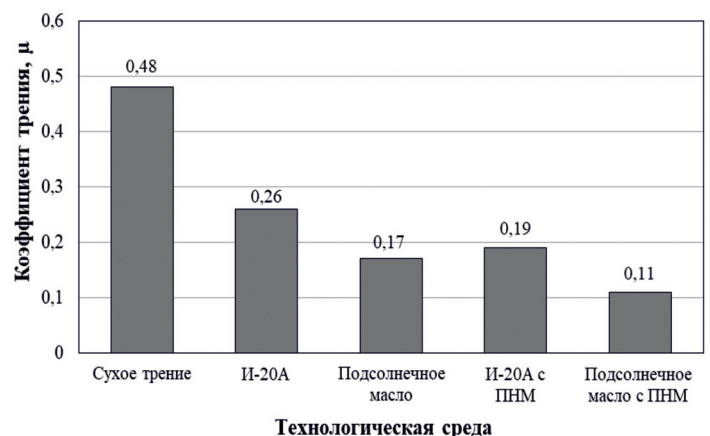


Рис. 5. Значения эмпирического коэффициента трения μ в среде различных СОТС

Fig. 5. Empirical friction coefficient (μ) values in various MWF environments

формацию, связанную с влиянием модификаторов – в данном случае ПНМ – на силу трения.

Следующим этапом после исследования влияния модифицированного СОТС на эмпирический коэффициент трения было определение силы резания при сверлении с использованием аналогичных СОТС. Для реализации поставленной задачи в процессе исследования был использован экспериментальный стенд (рис. 6), оснащенный трехкомпонентным динамометром М-30-3-6к, с выводом информации на персональный компьютер, позволяющий объективно оценить влияние различных СОТС на силу резания при операции сверления.

В результате экспериментальных исследований при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т были получены значения силы резания в зависимости от времени обработки и скорости резания (рис. 7, а, б).

Анализ полученных данных показывает, что сверление без использования СОТС приводит к возникновению высокой силы резания. Использование в качестве СОТС минерального и подсолнечного масел приводит к снижению силы резания на 10–20 %. Подача тех же видов масел, но уже с ПНМ, приводит к большему снижению

сил резания (на 9–10 %) по сравнению с маслом без присадки, при этом наименьшая величина достигается при подаче подсолнечного масла с ПНМ.

Из этого следует, что ПНМ, выступающая в качестве модификатора, улучшает трибологические свойства масляного СОТС, способствуя снижению температуры в зоне резания и повышению ресурса (стойкости) режущего инструмента [22].

Представленные данные на графике (рис. 7, б) демонстрируют, что при скоростях резания до 20 м/мин действие СОТС оказывает значительное влияние на силу резания P_z . Однако при увеличении скорости резания эффективность СОТС снижается, что связано с большой долей образованных сил трения по задней поверхности инструмента.

Определение шероховатости. Представляет интерес и влияние ПНМ на значение шероховатости обработанной поверхности, которая является одним из параметров качества. На шероховатость обработанной поверхности влияют различные факторы, такие как режимы резания, вид СОТС и способ его подачи в контактную зону, температура резания и др. [23, 24].

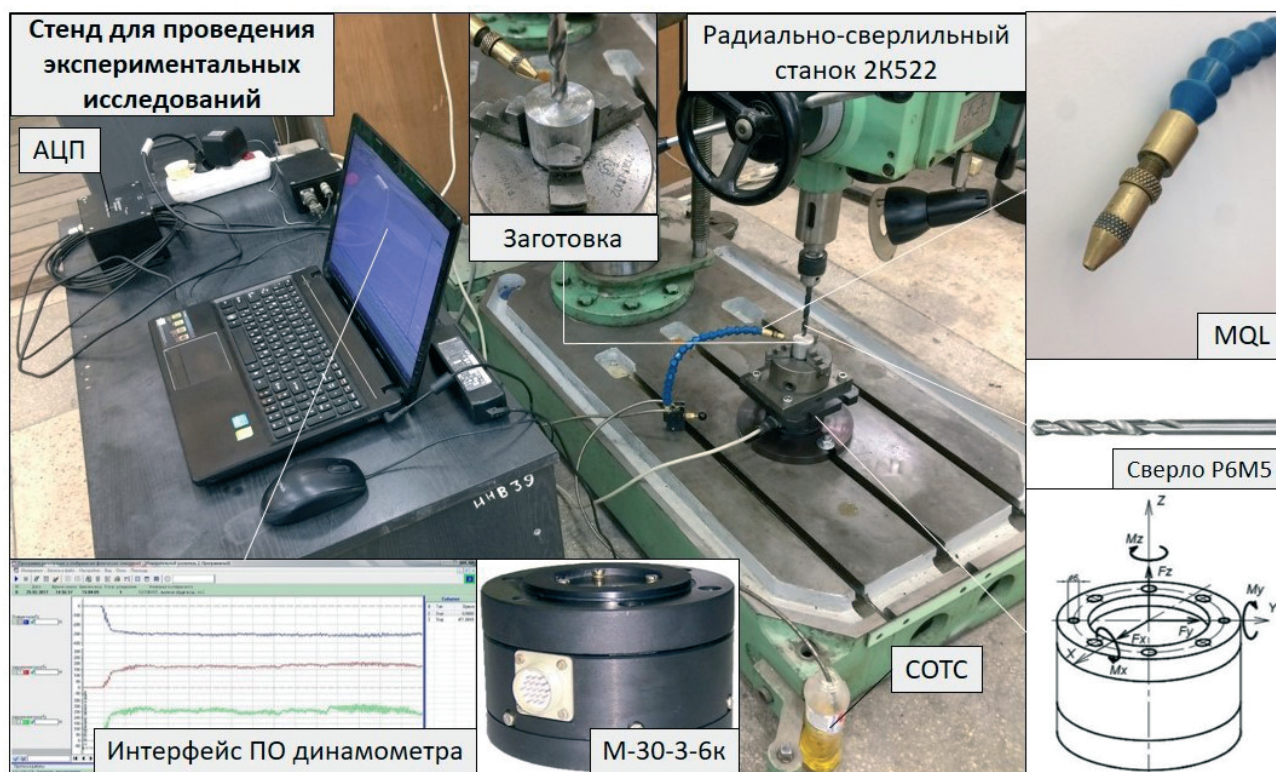


Рис. 6. Экспериментальный стенд для исследования сил резания при сверлении

Fig. 6. Experimental stand for studying cutting forces during drilling

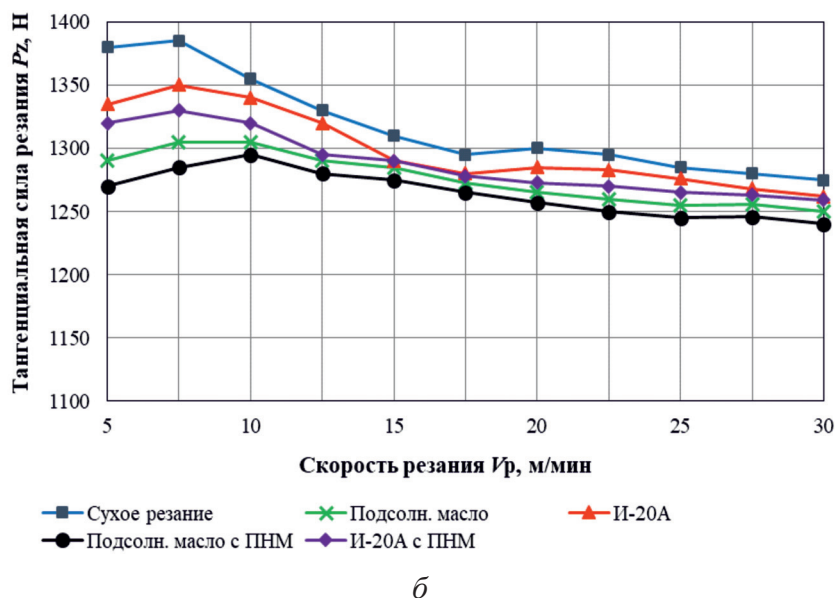
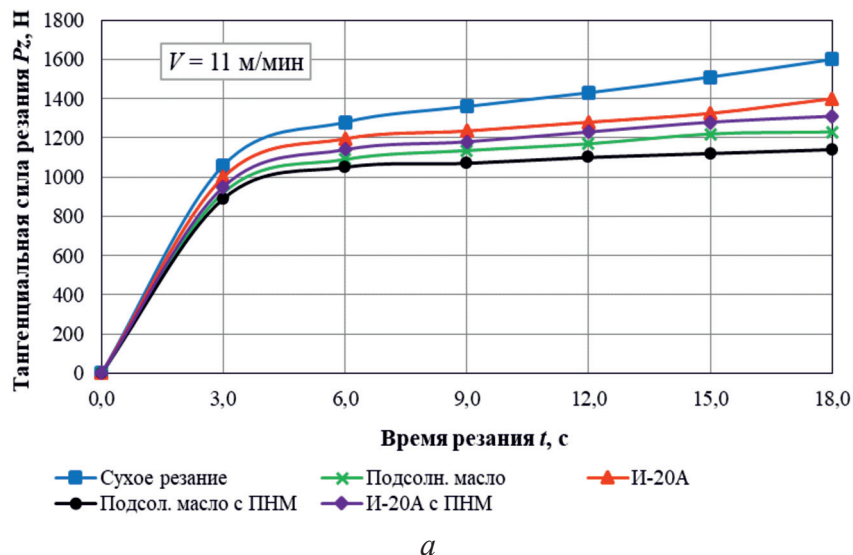


Рис. 7. Значения тангенциальной силы резания P_z в зависимости от времени обработки (а) и скорости резания (б) при подаче различных составов СОТС. Подача инструмента $S = 0,076$ мм/об. Режущий инструмент – сверло спиральное (Р6М5). $D = 22$ мм. Расход СОТС – 0,5 л/мин

Fig. 7. Tangential cutting force P_z values as a function of processing time (а) and cutting speed (б) with various MWF compositions applied. Tool feed $S = 0.076$ mm/rpm. Cutting tool – Spiral drill (HSS). $D = 22$ mm. MWF consumption – 0.5 l/min

Применение модифицированного масляного СОТС при сверлении заготовок из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с использованием ПНМ в качестве модификатора СОТС позволяет снизить температуру резания и шероховатость обработанной поверхности.

На рис. 8 показано среднеарифметическое отклонение профиля Ra , отражающее шеро-

ховатость обработанной поверхности, измерение которой осуществлялось профилометром TR-200.

Выводы

Применение ПНМ при их гидрировании позволяет перейти на жидкостное межпакетное

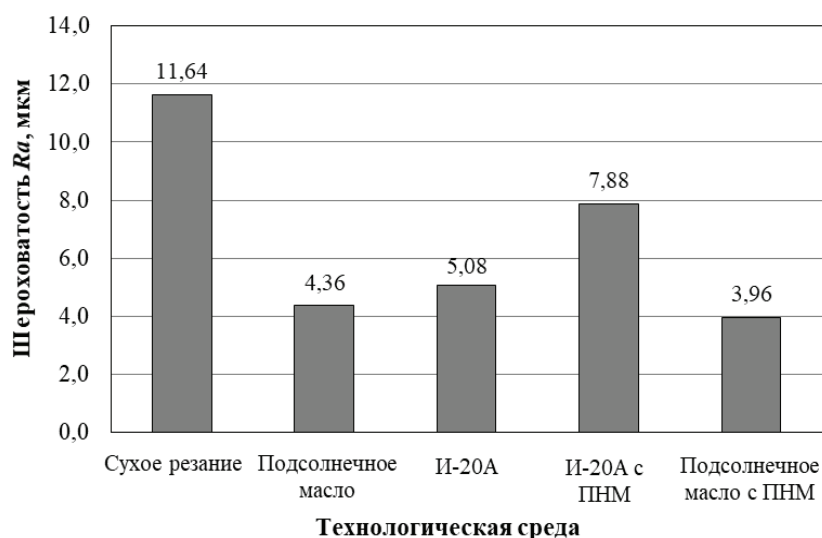


Рис. 8. Результаты среднеарифметического отклонения профиля Ra обработанной поверхности

Fig. 8. Results of the arithmetic mean deviation of the Ra profile of the processed surface

трение слоев минерала, создавая зону гидрорасклинивания и улучшая трибологические свойства масляных СОТС. Данный состав позволяет снизить температуру в зоне резания путем конвективного распределения тепла в объеме СОТС с дальнейшим его выводом из системы в окружающую среду.

Проведенные лабораторные исследования показали, что при подаче масляного СОТС с ПНМ эмпирический коэффициент трения имеет наименьшее значение ($\mu = 0,11$) по сравнению с другими составами.

Входящая в состав масляного СОТС ПНМ также оказала положительное влияние на снижение силы резания при сверлении стали 12Х18Н10Т (на 10 %) по сравнению с подачей СОТС без присадок, а также на уменьшение шероховатости обработанной поверхности до $Ra = 3,96$ мкм.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что использование ПНМ в сочетании с экологически безопасными маслами открывает принципиально новые пути их эффективного использования в процессе резания, при этом основное действие ПНМ направлено на повышение смазочного, охлаждающего, а также ресурсосберегающего действия СОТС.

Список литературы

1. Вережца А.С., Лиерат Ф., Дюбнер Л. Анализ основных аспектов проблемы экологически безопас-

ного резания // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, 2000. – Вып. 57. – С. 29–34.

2. Худобин Л.В., Жданов В.Ф. О возможности активации СОЖ импульсными электрическими полями // Чистовая обработка деталей машин. – Саратов, 1980. – С. 49–53.

3. Maddamasetty A., Revuru S., Sitaramaraju A. Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process // Materials and Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 29 (5). – DOI: 10.1080/10426914.2014.893060.

4. Tribological studies of transmission oil dispersed with molybdenum disulfide and tungsten disulfide nanoparticles / S. Vadapalli, R.N. Thakur, J. Amitabh Kumar, B.M. Saratchandra // Journal of Tribology. – 2016. – Vol. 139 (4). – DOI: 10.1115/1.4034766.

5. Abdulgazis D., Umerov E., Abdulgazis U. Development of endothermic properties and improvement of tribotechnological properties in oil cutting and cooling lubricants // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1503–1507. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.669.

6. O'Sullivan D., Cotterell M. Machinability of austenitic stainless steel SS303 // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 124 (1–2). – P. 153–159. – DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00197-8.

7. Nitrogen alloyed austenitic Ni-free stainless steel for additive manufacturing / A. Antikainen, T. Jokiahio, J. Lagerbom, T. Lindroos // Powder Metallurgy. – 2024. – Vol. 67 (1–2). – DOI: 10.1177/00325899241248996.

8. Multi-objective optimization of cutting parameters in turning AISI 304 austenitic stainless steel / Y. Su,

- G. Zhao, Y. Zhao, J. Meng, C. Li // *Metals*. – 2020. – Vol. 10 (2). – DOI: 10.3390/met10020217.
9. *Ahmed Y.S., Paiva J.M., Veldhuis S.C.* Characterization and prediction of chip formation dynamics in machining austenitic stainless steel through supply of a high-pressure coolant // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 102. – P. 1671–1688. – DOI: 10.1007/s00170-018-03277-7.
10. *Uysal A., Demiren F., Altan E.* Investigation of surface roughness and chip forms in milling of stainless steel by MQL method // *Acta Physica Polonica A*. – 2016 – Vol. 129 (4). – P. 439–441. – DOI: 10.12693/APhysPolA.129.439.
11. *Muthuswamy P., Murugesan V.G.V.* Machinability analysis in high speed turning of Ti–6Al–4V alloy and investigation of wear mechanism in AlTiN PVD coated tungsten carbide tool // *Engineering Research Express*. – 2021. – Vol. 3 (4). – DOI: 10.1088/2631-8695/ac2e12.
12. *Khan A.A., Ali M.Y., Haque M.M.* A new approach of applying cryogenic coolant in turning AISI 304 stainless steel // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. – 2010. – Vol. 5. – P. 171–174.
13. *Muthuswamy P., Nagarajan S.K.* Experimental investigation on the effect of different micro-geometries on cutting edge and wiper edge on surface roughness and forces in face milling // *Lubricants*. – 2021. – Vol. 9 (10). – P. 102. – DOI: 10.3390/lubricants9100102.
14. *Shiva Pradeep N., Padmakumar M., Sarada B.N.* Experimental investigation to assess the effects of trumpet hone on tool life and surface quality in milling of AISI4140 steel // *FME Transactions*. – 2019. – Vol. 47 (3). – P. 437–441. – DOI: 10.5937/fmet1903437S.
15. *Isik Y.* Investigating the machinability of tool steels in turning operations // *Materials and Design*. – 2007. – Vol. 28 (5). – P. 1417–1424. – DOI: 10.1016/j.matdes.2006.03.025.
16. *Абдулгасис Д.У., Мевлют Ш.Т., Абдулгасис У.А.* Использование эффекта расклинивающего давления для снижения адгезионного контакта между передней поверхностью зуба сверла и стружкой // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*. – 2020. – № 2 (68). – С. 237–242.
17. *Абдулгасис Д.У., Умеров Э.Д.* О возможности формирования эндотермических и улучшения триботехнологических свойств масляных СОТС присадкой наноглинистых минералов листовой структуры // *Известия Волгоградского технического университета. Прогрессивные технологии в машиностроении*. – 2016. – № 5 (184). – С. 7–11.
18. *Яцерицын П.И., Ефремов В.Д.* Основы резания металлов. – Минск: БГАТУ, 2008. – 644 с. – ISBN 978-985-6770-87-9.
19. *Abdulgazis D., Umerov E., Abdulgazis U.* Analysis of mathematical models of drilling describing surface quality and tool overload protection aspects // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 224. – DOI: 10.1051/mateconf/201822401126.
20. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
21. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / под общ. ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
22. *Латышев В.Н., Шлыков А.А.* Влияние состава СОЖ на величину крутящих моментов и стойкость сверл // *Технология машиностроения*. – 1967. – № 4. – С. 25–29.
23. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.
24. *Pirtini M., Lazoglu I.* Forces and hole quality in drilling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 99. – P. 1271–1281. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

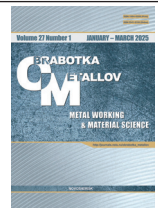
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Investigation of the effect of oil-based MWFs with enhanced tribological properties on cutting forces and roughness of the processed surfaces

Ervin Umerov^{1, 2, a, *}, Vladimir Skakun^{1, 2, b}, Ruslan Dzhemalyadinov^{1, 2, c}, Yuriy Egorov^{2, d}

¹ Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, 8 Uchebnyy side st., Simferopol, 295015, Russian Federation

² V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4 Academician Vernadsky ave., Simferopol, 295007, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-3477-2036>,  Ervin777@yandex.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0656-7852>,  vladimir.skakun.92@list.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-3319-3542>,  rus.dzhemalyadinov@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-4990-9998>,  yuriyegorov@cfuv.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 October 2024

Revised: 26 October 2024

Accepted: 21 November 2024

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Lubricating and cooling technological means
 Coefficient of friction
 Cutting forces
 Roughness

Funding

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 24-12-20013).

ABSTRACT

Introduction. One way to enhance the efficiency of the cutting process is to develop new effective compositions of metalworking fluids (*MWFs*), which will reduce cutting force and temperature, while increasing the durability of the cutting tool and the quality of the processed surface. One approach to address this challenge is the chemical activation of *MWF* using additives based on nanoclay minerals, which are characterized by low cost and abundant reserves in-Earth. In this regard, the theoretical rationale for the selection of this additive and its impact on the tribological properties of the *MWF* is given. **The purpose of the work** is to determine the effect of oil-based additives with nanoclay minerals on reducing the cutting force, as well as improving the quality of the processed surface when drilling corrosion-resistant steel. **Research methods.** Experimental investigations were conducted during a drilling operation, in which the components of the cutting force were recorded using a three-component dynamometer *M-30-3-6k*. The aim of the experiment was to determine the effect of oil-based *MWF* containing additives from nanoclay minerals on the component of the cutting force, as well as the roughness of the processed surface. A formula for calculating the friction coefficient in the drilling process was derived using mathematical modeling. **Results and Discussion.** The experimental investigations yielded results demonstrating the effectiveness of using oil-based *MWF* with additives made from nanoclay minerals. Experimental data was obtained for the friction coefficient, cutting force component, as well as the roughness of the processed surface during drilling. These results were obtained using the experimental *MWF*, supplied to the cutting zone. The results of the study showed the effectiveness of using the modified *MWF* compared to traditional compositions. **Conclusions.** The modified *MWF*, which includes sunflower oil and nanoclay minerals as additives, significantly reduces the friction coefficient, cutting force, as well as the roughness of the processed surface, which opens up further prospects for its use in the metalworking industry.

For citation: Umerov E.D., Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Egorov Y.A. Investigation of the effect of oil-based MWFs with enhanced tribological properties on cutting forces and roughness of the processed surfaces. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 6–19. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-6-19. (In Russian).

References

1. Vereshchaka A.S., Lierat F., Dyubner L. Analiz osnovnykh aspektov problemy ekologicheskii bezopasnogo rezaniya [Analysis of the main aspects of the problem of environmentally safe cutting]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh* [Cutting and tool in technological systems]. Kharkiv, 2000, iss. 57, pp. 29–34.
2. Khudobin L.V., Zhdanov V.F. O vozmozhnosti aktivatsii SOZh impul'snymi elektricheskimi polyami [On the possibility of activation of coolant by pulsed electric fields]. *Chistovaya obrabotka detalei mashin* [Finishing of machine parts]. Saratov, 1980, pp. 49–53.
3. Maddamasetty A., Revuru S., Sitaramaraju A. Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, vol. 29 (5). DOI: 10.1080/10426914.2014.893060.

* Corresponding author

Umerov Ervin D., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov
 8 Uchebnyy side st.,
 295015, Simferopol, Russian Federation
 Tel.: +7 978 832-72-92, e-mail: Ervin777@yandex.ru

4. Vadapalli S., Thakur R.N., Amitabh Kumar J., Saratchandra B.M. Tribological studies of transmission oil dispersed with molybdenum disulfide and tungsten disulfide nanoparticles. *Journal of Tribology*, 2016, vol. 139 (4). DOI: 10.1115/1.4034766.
5. Abdulgazis D., Umerov E., Abdulgazis U. Development of endothermic properties and improvement of tribotechnological properties in oil cutting and cooling lubricants. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1503–1507. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.669.
6. O’Sullivan D., Cotterell M. Machinability of austenitic stainless steel SS303. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 124 (1–2), pp. 153–159. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00197-8.
7. Antikainen A., Jokiahho T., Lagerbom J., Lindroos T. Nitrogen alloyed austenitic Ni-free stainless steel for additive manufacturing. *Powder Metallurgy*, 2024, vol. 67 (1–2). DOI: 10.1177/00325899241248996.
8. Su Y., Zhao G., Zhao Y., Meng J., Li C. Multi-objective optimization of cutting parameters in turning AISI 304 austenitic stainless steel. *Metals*, 2020, vol. 10 (2). DOI: 10.3390/met10020217.
9. Ahmed Y.S., Paiva J.M., Veldhuis S.C. Characterization and prediction of chip formation dynamics in machining austenitic stainless steel through supply of a high-pressure coolant. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102, pp. 1671–1688. DOI: 10.1007/s00170-018-03277-7.
10. Uysal A., Demiren F., Altan E. Investigation of surface roughness and chip forms in milling of stainless steel by MQL method. *Acta Physica Polonica A*, 2016, vol. 129 (4), pp. 439–441. DOI: 10.12693/APhysPolA.129.439.
11. Muthuswamy P., Murugesan V.G.V. Machinability analysis in high speed turning of Ti–6Al–4V alloy and investigation of wear mechanism in AlTiN PVD coated tungsten carbide tool. *Engineering Research Express*, 2021, vol. 3 (4). DOI: 10.1088/2631-8695/ac2e12.
12. Khan A.A., Ali M.Y., Haque M.M. A new approach of applying cryogenic coolant in turning AISI 304 stainless steel. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2010, vol. 5, pp. 171–174.
13. Muthuswamy P., Nagarajan S.K. Experimental investigation on the effect of different micro-geometries on cutting edge and wiper edge on surface roughness and forces in face milling. *Lubricants*, 2021, vol. 9 (10), p. 102. DOI: 10.3390/lubricants9100102.
14. Shiva Pradeep N., Padmakumar M., Sarada B.N. Experimental investigation to assess the effects of trumpet hone on tool life and surface quality in milling of AISI4140 steel. *FME Transactions*, 2019, vol. 47 (3), pp. 437–441. DOI: 10.5937/fmet1903437S.
15. Isik Y. Investigating the machinability of tool steels in turning operations. *Materials and Design*, 2007, vol. 28 (5), pp. 1417–1424. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.03.025.
16. Abdulazis D.U., Mevlut Sh.T., Abdulazis U.A. Ispol’zovanie efekta rasklinivayushchego davleniya dlya snizheniya adgezionnogo kontakta mezhdru perednei poverkhnost’yu zuba sverla i struzhkoi [Using wedging pressure effect to reduce adhesive contact between the front surface of a drill tooth and chips]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta = Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 2020, no. 2 (68), pp. 237–242.
17. Abdulgazis D.U., Umerov E.D. O vozmozhnosti formirovaniya endotermicheskikh i uluchsheniya tribotekhnologicheskikh svoistv maslyanykh SOTS prisadkoi nanoglinistykh mineralov listovoi struktury [On the possibility of formation of endothermic and improvement of biotechnological properties of oil LCTM by additive of nanoclay minerals of leaf structure]. *Izvestiya Volgogradskogo tekhnicheskogo universiteta. Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii = Izvestia of Volgograd State Technical University. Advanced Technology in Machine Bulding*, 2016, no. 5 (184), pp. 7–11.
18. Yashcheritsyn P.I., Efremov V.D. *Osnovy rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting]. Minsk, BGATU Publ., 2008. 644 p. ISBN 978-985-6770-87-9.
19. Abdulgazis D., Umerov E., Abdulgazis U. Analysis of mathematical models of drilling describing surface quality and tool overload protection aspects. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224. DOI: 10.1051/mateconf/201822401126.
20. Khudobin L.V., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskije sredstva i ikh primenenie pri obrabotke rezaniem* [Lubricating and cooling technological means and their application in cutting processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.
21. Entelis S.G., Berliner E.M., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskije sredstva dlya obrabotki metallov rezaniem* [Lubricating and cooling technological means for metal cutting: reference]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 496 p.



22. Latyshev V.N., Shlykov A.A. Vliyaniye sostava SOZh na velichinu krutyashchikh momentov i stoikost' sverl [The effect of coolant composition on the amount of torques and durability of drills]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 1967, no. 4, pp. 25–29. (In Russian).

23. GOST 25142–82. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniya* [State Standard 25142–82. Surface roughness. Terms and definitions]. Moscow, Standards Publ., 1982. 22 p.

24. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 99, pp. 1271–1281. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.004.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 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>).