

## Исследование СОЖ с использованием растительного масла, усиленного добавлением наночастиц, при токарной обработке

Джаввади Эшвара Маниканта <sup>1, a</sup>, Нитин Амбхор <sup>2, b, \*</sup>, Гонала Рао Телланутта <sup>3, c</sup>

<sup>1</sup> Женский инженерный колледж Шри Вишну (А), Бхимаварам, Андхра-Прадеш, 534202, Индия

<sup>2</sup> Технологический институт Вишвакармы, Махараштра, Пуна 411037, Индия

<sup>3</sup> Инженерно-технологический колледж Св. Анны, Чирала, Андхра-Прадеш, 523187, Индия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0881-4899>, [manijem66@gmail.com](mailto:manijem66@gmail.com); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8468-8057>, [nitin.ambhore@viit.ac.in](mailto:nitin.ambhore@viit.ac.in);

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5622-4140>, [drtgopalarao@gmail.com](mailto:drtgopalarao@gmail.com)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.895

#### История статьи:

Поступила: 11 ноября 2024

Рецензирование: 25 ноября 2024

Принята к печати: 17 декабря 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2025

#### Ключевые слова:

Растительные масла

Наножидкости

Высокоскоростная обработка

Экологическая устойчивость

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время при токарной обработке начинают постепенно использовать смазочно-охлаждающие жидкости на основе растительных масел с наночастицами, которые обеспечивают устойчивое и высокоэффективное решение за счет улучшения смазки, охлаждения и качества поверхности. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей на основе растительных масел с наночастицами также способствует экологически безопасному подходу в обрабатывающей промышленности. Они используются в качестве альтернативы традиционным смазочно-охлаждающим жидкостям, представляющим собой опасные химические смеси, которые создают угрозу для окружающей среды и оператора. **Цель работы.** Основное внимание в настоящем исследовании уделяется использованию смазочно-охлаждающих жидкостей на основе экологически чистых растительных масел в процессе токарной обработки. В работе исследуется производительность токарной обработки стали AISI 1014 при различных комбинациях и соотношениях наночастиц. **Методы исследования.** В текущем исследовании в качестве основы использованы пять различных растительных масел, таких как кукурузное масло, кокосовое масло, подсолнечное масло, пальмовое масло и масло семян дерева ним. Для создания наножидкостей в базовую жидкость добавляют CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, графен и порошкообразные многослойные углеродные нанотрубки. Разработаны смазочно-охлаждающие жидкости с различными концентрациями наночастиц (0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе) и исследована их производительность при обработке стали AISI 1014. **Результаты и обсуждение.** Результаты показали, что среди растительных масел кукурузное масло оказывает наибольшее влияние на вязкость и теплопроводность. Наночастицы графена показали многообещающие результаты в снижении силы резания, температуры и шероховатости поверхности. При использовании кукурузного масла, содержащего 0,8 масс. % наночастиц графена, наблюдается снижение силы резания до 104 Н, что на 29,8 % меньше, чем при использовании чистого кукурузного масла. При высокой концентрации (1 масс. %) наночастиц снижение нагрузки уменьшается из-за значительной агломерации наночастиц. Оптимальная концентрация наночастиц в базовой жидкости (кукурузном масле) составляет 0,8 масс. %.

**Для цитирования:** Маниканта Д.Э., Амбхор Н., Телланутта Г.Р. Исследование СОЖ с использованием растительного масла, усиленного добавлением наночастиц, при токарной обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 20–33. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33.

## Введение

Смазочно-охлаждающая жидкость играет важную роль в любой операции резки металла, обеспечивая смазывание поверхности контакта между инструментом и заготовкой, а также очищая зону резания от стружки и охлаждая по-

верхности заготовки и режущего инструмента [1]. Однако неправильное использование смазочно-охлаждающей жидкости и неправильные методы ее утилизации могут оказывать негативное влияние как на окружающую среду, так и на здоровье человека. Целью токарной обработки является удаление материала с заготовки для получения требуемой чистоты поверхности и размеров. При точении материал постепенно удаляется путем вращения заготовки относительно одноточечного режущего инструмента [2]. Мно-

#### \*Адрес для переписки

Амбхор Нитин, к.т.н., доцент

Технологический институт Вишвакармы,

Пуна 411037, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950441, e-mail: [nitin.ambhore@viit.ac.in](mailto:nitin.ambhore@viit.ac.in)



гие отрасли, включая судостроение, энергетику, строительство и автомобилестроение, широко используют этот метод. В то же время высокое давление резания, трение, износ инструмента, высокие температуры на поверхности контакта инструмента и заготовки, а также значительное потребление энергии представляют собой серьезные проблемы при токарной обработке [3, 4]. Повышение стабильности и эффективности токарных операций требует снижения сил резания и потребления энергии. Использование смазочно-охлаждающей жидкости играет важную роль для устранения этих проблем и повышения качества обработки [5, 6].

Традиционные смазочно-охлаждающие жидкости, особенно полученные из минеральных масел, могут содержать опасные компоненты, включая бактерициды, смачивающие агенты, консерванты и агенты высокого давления, которые могут наносить вред как окружающей среде, так и рабочим [7]. Кроме того, переработка и утилизация использованных смазочно-охлаждающих жидкостей загрязняет окружающую среду [8]. В связи с этими проблемами растет интерес к исследованию альтернативных вариантов смазки для токарных операций [9]. Смазывающие свойства, экономическая эффективность и биоразлагаемость смазочных материалов на основе растительных масел сделали последние привлекательной альтернативой при использовании в условиях минимального количества смазки (MQL) [10]. С точки зрения КПД инструмента, стоимости, экологической безопасности и охраны труда MQL может заменить традиционное охлаждение с обильным поливом. Кроме того, используя экологически чистые смазочные материалы и методы смазки, токарная промышленность может снизить свое воздействие на окружающую среду, одновременно повышая эффективность обработки и качество продукции [11].

В настоящее время для токарной обработки в промышленности используются различные смазочно-охлаждающие жидкости. В основном это минеральные, натуральные, синтетические и полусинтетические масла. Многие исследователи использовали эти смазочно-охлаждающие жидкости и изучили производительность процесса токарной обработки.

Маниканта и др. (Manikanta et al.) [12] использовали кукурузное масло в качестве смазочно-

но-охлаждающей жидкости при точении стали SS 304. Результаты показали, что использование кукурузного масла в условиях MQL улучшает силу резания, температуру и срок службы инструмента по сравнению с обработкой без СОЖ. Влияние различных растительных масел, включая соевое, арахисовое, кукурузное, рапсовое, пальмовое, касторовое и подсолнечное, на шлифование никелевого сплава в условиях MQL было исследовано Ваном и др. (Wang et al.) [13]. Результаты показали, что кокосовое масло быстро впитывалось в инструменты и заготовки и обладало превосходным смазывающим эффектом. Касторовое масло превзошло другие шлифовальные жидкости по смазывающим свойствам и качеству поверхности заготовки. Шайх и Сидху (Shaikh and Sidhu) [14] получили благоприятные результаты при обработке стали D2 с использованием смазочно-охлаждающей жидкости на основе непищевого растительного масла. Результаты их экспериментов показали, что чистота обработанной поверхности при использовании минерального, соевого и хлопкового масла была практически одинаковой, с отклонениями менее 10 %.

Путтасвами и Рамачандра (Puttaswamy and Ramachandra) [15] изучили возможность использования масла мадуки и масла семян дерева ним в качестве буровых жидкостей при обработке стали AISI 304L в условиях MQL при давлении 2 бара. Они пришли к выводу, что по всем параметрам масло семян дерева ним и масло мадуки превзошли традиционные смазочно-охлаждающие жидкости. Ли и др. (Li et al.) [16] проводили эксперименты по шлифованию в условиях MQL с чистым растительным маслом. Их исследование показало, что пальмовое масло является наиболее подходящим базовым маслом для шлифования высокотемпературного никелевого сплава в условиях MQL с точки зрения соотношения энергии и температуры шлифования. Согласно исследованиям Бабу и др. (Babu et al.) [17] оливковое масло снижало шероховатость поверхности и износ инструмента при фрезеровании стали AISI 304 в условиях MQL. Радхика и др. (Radhika et al.) [18] использовали кунжутное масло в качестве смазочно-охлаждающей жидкости при токарной обработке стали AISI 1014 и наблюдали улучшение качества обработанной поверхности и снижение силы резания.

Для шлифования в условиях MQL Го и др. (Guo et al.) [19] изучали шесть различных масел в сочетании с касторовым маслом.

Теплопроводность и смазывающие свойства растительных масел могут быть значительно увеличены за счет добавления наночастиц, что повышает эффективность обработки [20, 21]. Проводились исследования по изучению влияния добавления наночастиц в экологически чистые растительные масла на повышение эффективности резания в сценариях MQL. В своем исследовании Нам и др. (Nam et al.) [22] изучили использование наножидкости в условиях MQL при микросверлении. Их анализ показал, что использование наножидкости в условиях MQL приводит к значительному снижению крутящих моментов и осевых усилий при сверлении и увеличению количества просверленных отверстий. Кроме того, наножидкость в условиях MQL эффективно удаляет оставшуюся стружку и заусенцы, что улучшило общее качество просверленных отверстий. Шен и др. (Shen et al.) [23] диспергировали наночастицы  $\text{MoS}_2$ , алмаза и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в растительном масле для изучения сил и абразивного износа инструмента при почти сухом шлифовании. Их исследование показало, что шлифование в условиях MQL с использованием алмазных наночастиц размером 100 нм в объемной концентрации 1,5 % обеспечивает наибольшее снижение усилия.

Васу и др. (Vasu et al.) в работе [24] изучили влияние MQL с наночастицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на качество поверхности Inconel 600. Согласно их данным, более высокая объемная доля наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в растительном масле привела к более высокому качеству поверхности. В исследовании Ни и др. (Ni et al.) [25] графен добавляли к трем различным растительным маслам (касторовому, кукурузному и рапсовому) в разных массовых долях для улучшения нарезания резьбы в условиях MQL на алюминиевом сплаве ADC12. Ученые обнаружили, что концентрация графена 0,5 масс. % обеспечивает наименьший средний крутящий момент независимо от типа базового масла. Высококачественные резьбовые поверхности также были получены с помощью суспензии на основе 0,5 масс. % касторового масла в условиях MQL. Используя метод, состоящий из двух этапов, Чжан

и др. (Zhang et al.) [26] создали наножидкости с наночастицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а затем отшлифовали заготовку из Ti-6Al-4V в условиях MQL с воздухом, охлажденным до криогенных температур. Согласно экспериментальным результатам, сочетание наножидкости и криогенно охлажденного воздуха демонстрирует превосходное качество шлифования, превосходя как криогенное охлаждение воздухом, так и использование СОЖ с наночастицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по отдельности. Многослойные углеродные нанотрубки были добавлены в подсолнечное масло в исследовании Манойкумара и Гоша (Maojkumar and Ghosh) [27] для шлифования стали AISI 52100 в условиях малого количества охлаждающей смазки (SQCL). Их анализ показал, что разработанная жидкость улучшает качество поверхности заготовки и продлевает срок службы шлифовального круга [28].

Экологически рациональные методы являются крайне важными в секторах, производящих механическую обработку, и выбор правильных смазочно-охлаждающих жидкостей играет ключевую роль в снижении негативного воздействия на окружающую среду. В предыдущих исследованиях основное внимание уделялось использованию экологически чистых смазочно-охлаждающих жидкостей при точении, фрезеровании, сверлении, развертывании и шлифовании среди прочих операций механической обработки. Исследования растительных масел с добавлением наночастиц в различных концентрациях практически не представлены.

В данном исследовании предпринята попытка восполнить этот пробел путем использования как чистого растительного масла, так и наножидкостей на основе растительного масла при механической обработке в условиях MQL. В исследовании определено лучшее растительное масло для применения в качестве экологически чистой смазочно-охлаждающей жидкости, а также проведена оценка различных комбинаций и соотношений наночастиц с целью повышения производительности обработки. В статье представлен инновационный взгляд на составы смазочно-охлаждающих жидкостей для достижения лучших результатов механической обработки в металлорежущей промышленности с использованием комплексной методологии.

## Методы

Для токарной обработки в качестве материала заготовки была выбрана сталь AISI 1014. Использовали пять базовых жидкостей: кукурузное масло, кокосовое масло, подсолнечное масло, пальмовое масло и масло семян дерева ним. Наночастицы оксида меди ( $\text{CuO}$ ) (уровень чистоты 99,5 %, размерный диапазон от 30 до 50 нм) и наночастицы оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (уровень чистоты 99,5 %, размерный диапазон от 30 до 50 нм) поставлялись лабораторией Platonic Nanotech Private Limited (Индия). Многослойные углеродные нанотрубки (уровень чистоты 99,9 %, размерный диапазон от 5 до 20 нм, морфология: порошкообразные) и графеновые наночастицы (уровень чистоты 99,5 %, размерный диапазон от 5 до 10 нм) поставлялись той же лабораторией.

В качестве базовой жидкости использовали чистое кукурузное масло, в которое затем добавляли наночастицы для создания наносмазочно-охлаждающей жидкости. Концентрации смешанных порошкообразных частиц в базовой жидкости рассчитывали следующим образом: 0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе. НаноСОЖ размешивали с помощью ультразвукового смесителя и магнитной мешалки. Перемешивание магнитной мешалкой длилось три часа, а ультразвуковая обработка – шесть часов. В результате была получена однородная и стабильная суспензия. Для каждого испытания брали свежий образец стабильной дисперсионной наноСОЖ и сразу же использовали, чтобы пре-

дотворить любую потенциальную агломерацию или седиментацию.

Обработку стали AISI 1014 проводили на токарном станке в условиях MQL. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Более подробно зона токарной обработки и фотография экспериментальной установки показаны на рис. 2. На жестком держателе инструмента (PSBNR2525M-12) механически закреплена твердосплавная пластина с покрытием (SNMG120408 NSU). Кроме того, в зоне механической обработки для подачи СОЖ использовали систему MQL, которая состояла из компрессора, контроллера потока, осушителя воздуха и распылительной форсунки. В системе MQL давление подачи воздуха составляло 5 бар, а скорость потока наноСОЖ – 20 мл/мин. Распылительная форсунка была расположена непосредственно над передней поверхностью инструмента на расстоянии 4 см.

В этом исследовании изучаются параметры механической обработки, такие как сила резания, температура резания и шероховатость поверхности, при токарной обработке с использованием токарного станка Turn Master 35 Center Lathe Machine (производства KIRLOSKAR) в тумане смазочно-охлаждающих жидкостей с наночастицами различной концентрации. Среднее значение результатов регистрировали после того, как испытания были проведены не менее трех раз. Для измерения силы резания применялся динамометр Kistler (тип 9275B), в котором использованы трехкомпонентные пьезоэлектрические кристаллы. В течение регулярного пери-

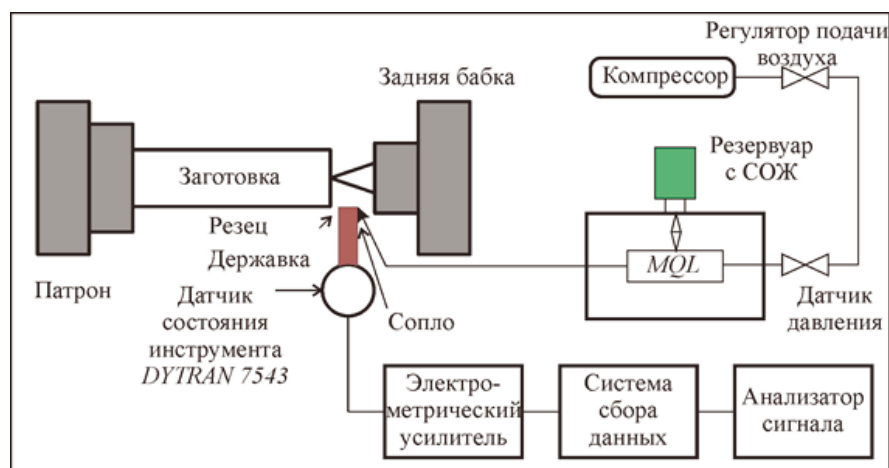


Рис. 1. Экспериментальная методология

Fig. 1. Experimental methodology



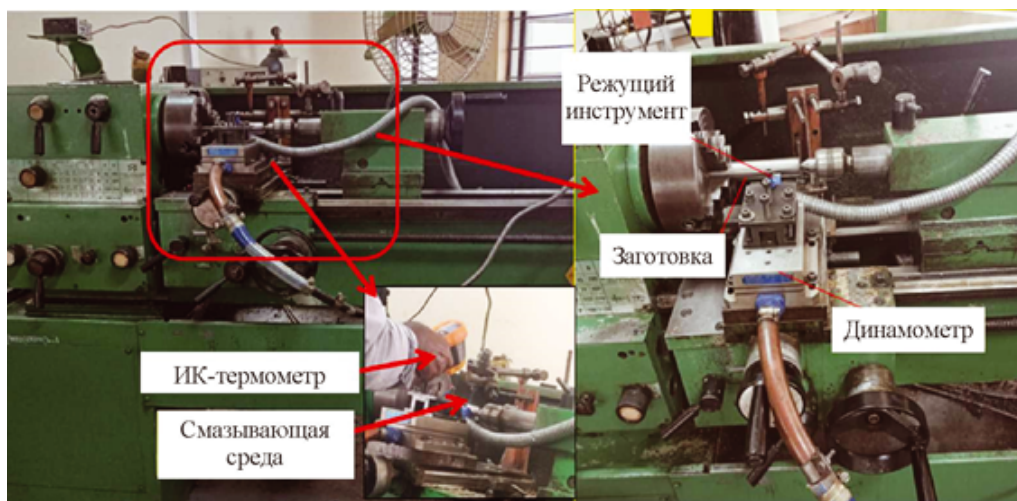


Рис. 2. Экспериментальная установка с MQL (минимальным количеством смазки)

Fig. 2. Experimental setup with MQL

ода были зафиксированы средние значения сил резания. Для измерения температуры резания использовали цифровой пирометр. С помощью контактного измерительного прибора Surftest SJ-210 была определена средняя шероховатость поверхности ( $Ra$ ) заготовки. Каждое действие токарной обработки регистрировали с данными при различных условиях механической обработки.

### Результаты и их обсуждение

Настоящее исследование посвящено изучению свойств различных масел, в частности их теплопроводности и вязкости при 25 °С. Эти свойства имеют решающее значение при определении пригодности масел для различных областей применения, особенно в производстве. Среди рассмотренных масел кукурузное демонстрирует самую высокую теплопроводность – 0,154 Вт/м·К. Теплопроводность относится к способности материала проводить тепло, а в контексте масел она указывает на то, насколько эффективно масло может отводить тепло. Более высокая теплопроводность подразумевает лучшие возможности теплопередачи, что делает масло пригодным для применения в областях, где критически важно эффективное рассеивание тепла. Высокая теплопроводность кукурузного масла предполагает, что оно может эффективно отводить тепло от источника, тем самым помогая поддерживать оптимальные рабочие температуры в оборудовании или тепловых системах.

Теплопроводность различных растительных масел показана на рис. 3.

Вязкость характеризует сопротивление жидкости течению и зависит от таких факторов, как температура и молекулярная структура. При 25 °С вязкость кукурузного масла составляет 61 сП (сантипуаз), что указывает на его сопротивление течению при этой конкретной температуре. Вязкость различных растительных масел показана на рис. 4. Вязкость играет решающую роль в тех областях применения, где масла используют для снижения трения и износа между движущимися компонентами. Масла с более высокой вязкостью, как правило, обеспечивают лучшее смазывание и образование пленки, тем

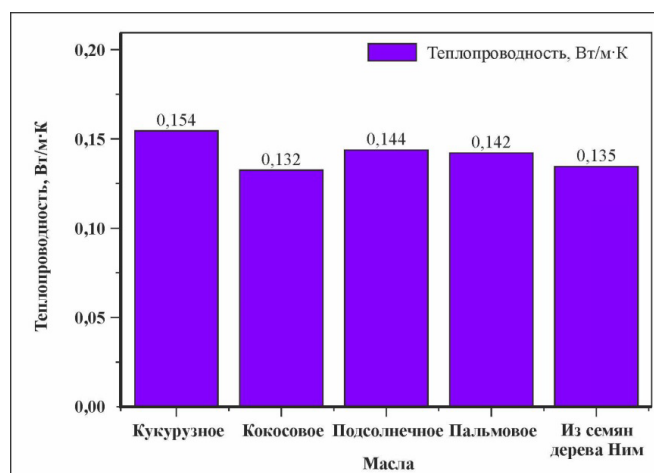


Рис. 3. Теплопроводность различных растительных масел

Fig. 3. Thermal conductivity of different vegetable oils

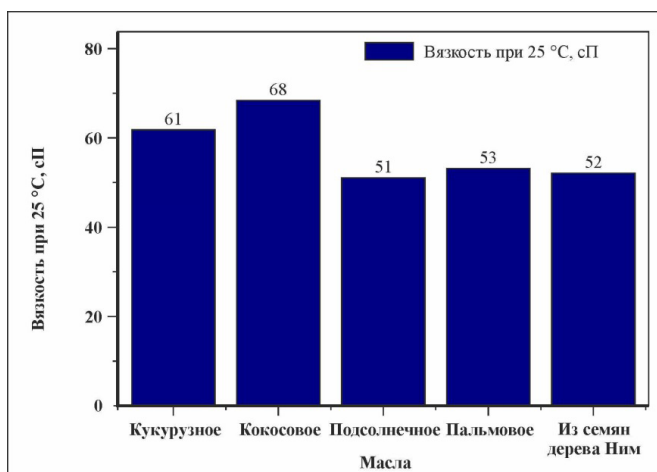


Рис. 4. Вязкость различных растительных масел

Fig. 4. Viscosity of different vegetable oils

самым защищая механические компоненты от повреждений. Сочетание высокой теплопроводности и умеренной вязкости делает кукурузное масло наиболее подходящим для различных промышленных применений. Его способность эффективно проводить тепло, обеспечивая при этом достаточное смазывание, может повысить производительность и долговечность машин и оборудования. В процессах обработки металла, таких как механическая обработка, где выделение тепла неизбежно, использование кукурузного масла в качестве смазочно-охлаждающей жидкости может помочь эффективно рассеивать тепло, предотвращая износ инструмента и продлевая срок его службы.

Добавление наночастиц в кукурузное масло служит эффективной стратегией минимизации трения благодаря их превосходным трибологическим и термофизическим характеристикам по сравнению с базовой жидкостью. НаноСОЖ демонстрируют исключительную эффективность, обусловленную несколькими механизмами, включая образование прокатываемой защитной пленки, а также эффекты восстановления и полировки. На рис. 5 представлена теплопроводность различных наножидкостей.

Во всех наножидкостях теплопроводность увеличивается до 0,8 % при добавлении наночастиц. Однако когда концентрация наночастиц достигает 1 %, происходит снижение теплопроводности из-за явлений седиментации или агломерации. В работе оценивали влияние различных нанопорошков ( $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , графена и многослойных углеродных нанотрубок) на свой-

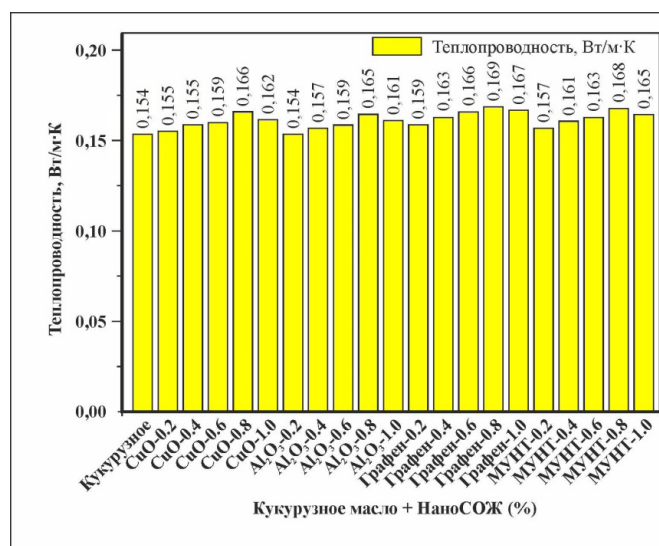


Рис. 5. Теплопроводность различных наноСОЖ

Fig. 5. Thermal conductivity of different nanofluids

ства наножидкостей. Среди них графеновые наножидкости продемонстрировали наиболее перспективные результаты по теплопроводности. В частности, по сравнению с теплопроводностью базового кукурузного масла, равной 0,154 Вт/м·К, теплопроводность графенового масла с концентрацией наночастиц 0,8 % выросла на 9,74 %, достигнув 0,169 Вт/м·К.

Примечательно, что графеновые наножидкости неизменно превосходили другие типы; за ними следовали наноСОЖ с добавлением многослойных углеродных нанотрубок, а затем – оксида меди и оксида алюминия. Эти результаты подчеркивают высокий потенциал наножидкостей на основе графена в повышении теплопроводности по сравнению с обычными базовыми жидкостями. Это связано с исключительной теплопроводностью графена, которую можно объяснить его уникальной атомной структурой и свойствами. Графен представляет собой один слой атомов углерода, расположенных в двумерной сотовой решетке, что обеспечивает эффективную передачу тепла благодаря высокой длине свободного пробега фононов и баллистическому переносу носителей тепла. Кроме того, графен обладает превосходной механической прочностью и стабильностью, предотвращая структурные деформации, которые могут препятствовать передаче тепла. Благодаря своей огромной площади поверхности он может легче взаимодействовать с соседними молекулами, что повышает эффективность теплопередачи.

На рис. 6 представлена столбчатая диаграмма, отражающая значения вязкости, наблюдаемые в наножидкостях. Для всех наножидкостей характерно заметное увеличение вязкости до 0,8 % при добавлении наночастиц. Однако как только концентрация наночастиц достигает 1 %, происходит снижение вязкости из-за явления седиментации или агломерации. Различные нанопорошки, включая  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , графен и многослойные углеродные нанотрубки, прошли оценку в наножидкостях различного состава. Среди них графеновые наножидкости продемонстрировали наиболее благоприятные показатели вязкости. Например, по сравнению с вязкостью базового кукурузного масла, равной 61 сП, вязкость графенового масла с концентрацией наночастиц 0,8 % заметно увеличилась – на 21,3 %, достигнув 74 сП. Примечательно, что графеновые наножидкости неизменно превосходили другие типы и с точки зрения улучшения вязкости. Полученные результаты подчеркивают значительный потенциал наножидкостей на основе графена в улучшении характеристик вязкости по сравнению с обычными базовыми жидкостями. Это связано с тем, что графен обладает прочностью, сводя к минимуму структурные деформации внутри жидкости, что способствует повышению вязкости.

Высокие силы резания приводят к быстрому износу инструмента, сокращению срока его службы и увеличению частоты смены инструмента. Кроме того, они приводят к плохому ка-

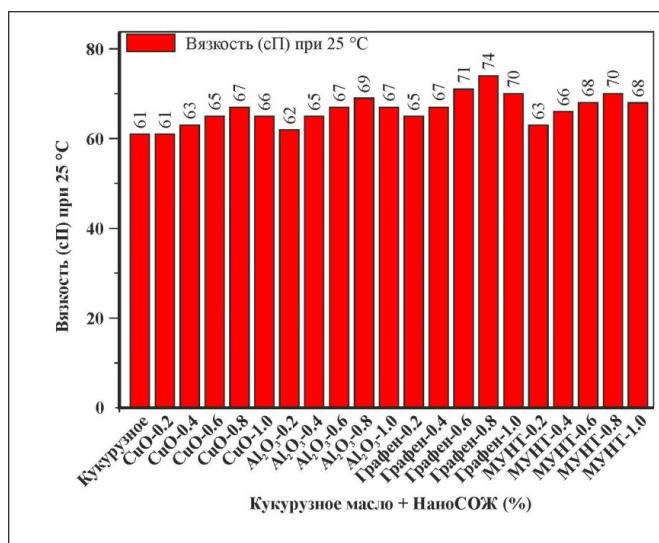


Рис. 6. Вязкость различных наноСОЖ

Fig. 6. Viscosity of different nanofluids

честву поверхности из-за вибраций во время обработки. Различные нанопорошки, включая  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , графен и многослойные углеродные нанотрубки, прошли оценку в наножидкостях различного состава. На рис. 7 показана измеренная сила резания при различных концентрациях наноСОЖ: 0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе. Среди них графеновые наножидкости продемонстрировали наиболее значительное снижение силы резания. Сила резания, создаваемая при использовании базовой смазочно-охлаждающей жидкости, составила 135 Н. Однако при использовании наножидкости с концентрацией графена 0,8 масс. % сила резания снизилась до 104 Н, т. е. на 29,8 %. Это снижение силы резания можно объяснить улучшенным смазыванием. Наночастицы на поверхности металла образовали прочную смазочную пленку, что привело к лучшему рассеиванию тепла. Более высокая теплопроводность и лучшее смазывание в результате увеличения концентрации графена снизили трение и тепловыделение. Однако при использовании наноСОЖ с концентрацией графена 1 масс. % сила резания увеличилась до 108 Н по сравнению с наноСОЖ, содержащей 0,8 масс. % графена, в первую очередь из-за агломерации наночастиц, что ухудшило характеристики наножидкости.

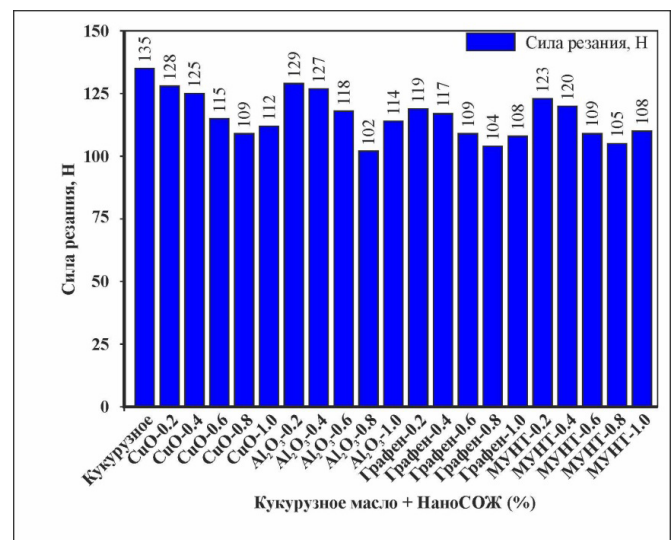


Рис. 7. Силы резания при использовании различных наноСОЖ

Fig. 7. Cutting forces when using different nanofluids

Трибологические свойства детали определяют ее способность эффективно и долгосрочно выполнять свою предполагаемую функцию в



предполагаемой области применения. Качество поверхности является одним из ключевых факторов, влияющих на трибологические характеристики. Поэтому предпочтительны низкие значения шероховатости поверхности в изготовленных изделиях. В этом исследовании изучалось влияние нескольких типов наножидкостей на среднее значение шероховатости поверхности. Различные нанопорошки, включая CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, графен и многослойные углеродные нанотрубки, прошли оценку в наножидкостях различного состава. На рис. 8 показана измеренная шероховатость поверхности при различных концентрациях наноСОЖ: 0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе. Среди них использование графеновых наножидкостей привело к наиболее значительному снижению шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности, полученная при использовании базовой смазочно-охлаждающей жидкости, составила 1,18 мкм. Однако при использовании наножидкости с концентрацией графена 0,8 масс. % шероховатость поверхности снизилась до 0,78 мкм, т. е. на 51,3 %. Это снижение шероховатости можно объяснить улучшенным смазыванием. Наночастицы на поверхности металла образовали прочную смазочную пленку, что привело к лучшему рассеиванию тепла. Более высокая теплопроводность и лучшее смазывание в результате увеличения концентрации графена снизили трение

и тепловыделение. Однако при использовании наноСОЖ с концентрацией графена 1 масс. % шероховатость увеличилась до 0,8 мкм по сравнению с наноСОЖ, содержащей 0,8 масс. % графена, в основном из-за агломерации наночастиц, что ухудшило характеристики наножидкости.

Высокие температуры резания ускоряют износ режущего инструмента, вызывая размягчение и износ материалов инструмента, что приводит к сокращению срока его службы. Высокие температуры резания могут отрицательно влиять на качество поверхности. Экстремальные температуры резки могут вызывать изменения в микроструктуре материала заготовки из-за тепла, выделяемого в процессе механической обработки. Это может влиять на такие свойства заготовки, как твердость, прочность на разрыв и остаточные напряжения. В этом исследовании изучалось, как различные типы наножидкостей влияют на среднее значение температуры резки. Различные нанопорошки, включая CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, графен и многослойные углеродные нанотрубки, прошли оценку в наножидкостях различного состава. На рис. 9 показана измеренная температура резки при различных концентрациях наноСОЖ: 0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе. Среди них использование графеновых наножидкостей привело к наиболее значительному снижению температуры резания. Температура резания, полученная при использовании

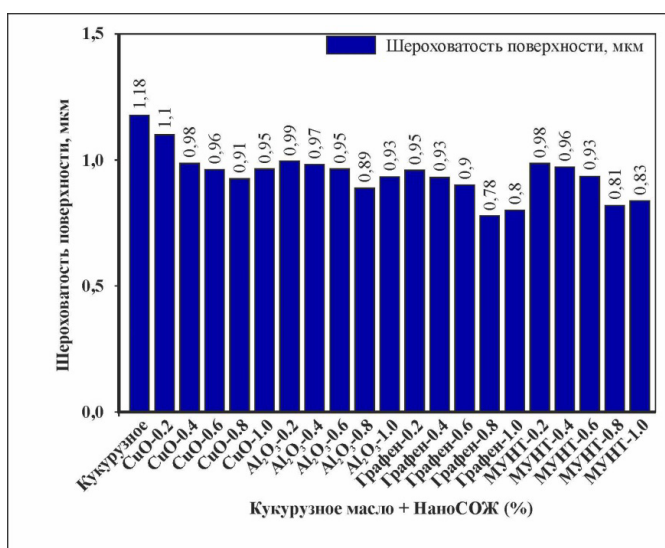


Рис. 8. Шероховатость поверхности при использовании различных наноСОЖ

Fig. 8. Surface roughness when using different nanofluids

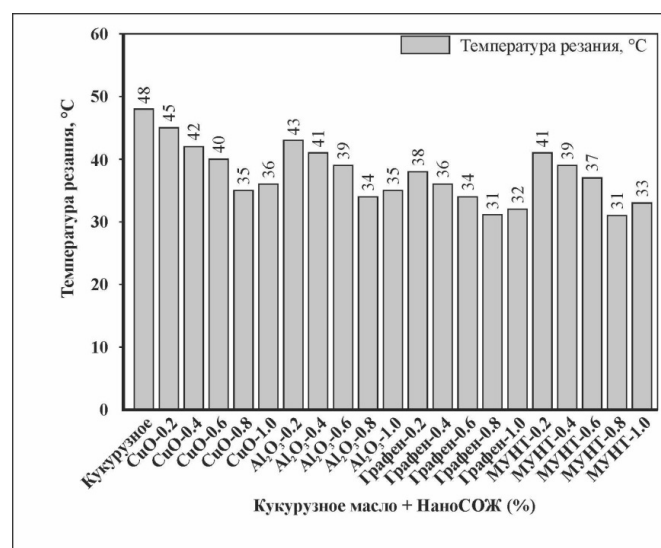


Рис. 9. Температура резания при использовании различных наноСОЖ

Fig. 9. Cutting temperature when using different nanofluids



базовой смазочно-охлаждающей жидкости, составила 48 °С. Однако при использовании наножидкости с концентрацией графена 0,8 масс. % температура резания снизилась до 31 °С, т. е. на 54,2 %. Это снижение шероховатости можно объяснить улучшенным смазыванием. Наночастицы на поверхности металла образовали прочную смазочную пленку, что привело к лучшему рассеиванию тепла. Более высокая теплопроводность и лучшее смазывание в результате увеличения концентрации графена снизили трение и тепловыделение. Однако при использовании наноСОЖ с концентрацией графена 1 масс. % температура резания увеличилась до 32 °С по сравнению с наноСОЖ, содержащей 0,8 масс. % графена, в основном из-за агломерации наночастиц, что ухудшило характеристики наножидкости.

### Заключение

В данном исследовании сообщается об экспериментах по точению стали AISI 1014 в условиях MQL с использованием пяти типов растительных масел. После этого в качестве базового масла было выбрано кукурузное масло. Для создания наножидкостей в базовую жидкость добавляли CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, графен и порошкообразные многослойные углеродные нанотрубки. Найдена идеальная концентрация и тип наночастиц. Ниже приведены краткие выводы.

- Среди рассмотренных растительных масел кукурузное масло оказывает наиболее существенное влияние на теплофизические характеристики, такие как вязкость и теплопроводность.

- Из четырех типов рассмотренных наночастиц графеновые наночастицы обеспечивают наибольшее снижение силы резания, температуры и шероховатости поверхности во время процесса токарной обработки. Экспериментально подтверждено, что при использовании кукурузного масла, содержащего 0,8 масс. % графеновых наночастиц, происходит снижение силы резания до значения 104 Н, что на 29,8 % меньше, чем в случае чистого кукурузного масла.

- Эффект наножидкости, сила резания, температура резания и шероховатость поверхности уменьшаются при заданном содержании наночастиц. Однако при высокой концентрации наночастиц (1 масс. %) снижение нагрузки уменьшается

из-за значительной агломерации наночастиц. Идеальная концентрация наночастиц в принимающей жидкости (кукурузном масле) остается на уровне 0,8 масс. %.

Потенциал для будущих исследований в области экологически рациональных процессов механической обработки является значительным. Предлагаются средства для смягчения экологического ущерба по сравнению с традиционными методами смазки и смазочными материалами, а также демонстрируются многообещающие разработки в экономических и социальных аспектах. Продолжая изучение экологически чистых наноСОЖ (NCF) в рамках MQL, можно использовать несколько направлений. Дальнейшие исследования производства ди- и тригибридных наночастиц могут улучшить функциональные свойства смазочно-охлаждающих жидкостей. Это включает в себя изучение разработки путей биосинтеза растительных экстрактов для приготовления наночастиц. Оценка влияния разработанных NCF на эксплуатационные характеристики различных металлов, сплавов и композитов в процессе токарной обработки имеет большое значение.

### Список литературы

1. Ghosh S., Rao P.V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Vol. 100. – P. 17–34. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.039.
2. O'Sullivan D., Cotterell M. Temperature measurement in single point turning // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 118 (1–3). – P. 301–308. – DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00853-6.
3. Waydande R.P., Ghatge D.A. Performance evaluation of cutting parameters for surface roughness & power consumption in turning of 904L stainless steel using vegetable oil based cutting fluids // *Advanced Manufacturing and Materials Science: Selected Extended Papers of ICAMMS*. – Springer, 2018. – P. 317–325. – DOI: 10.1007/978-3-319-76276-0\_32.
4. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method / M.H. Cetin, B. Ozcelik, E. Kuram, E. Demirbas // *Journal of Cleaner Production*. – 2011. – Vol. 19. – P. 2049–2056. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013.
5. Manikanta J.E., Ambhore N., Nikhare C. Application of sustainable techniques in grinding process for enhanced machinability: a review // *Journal of*

the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Vol. 46. – DOI: 10.1007/s40430-024-04801-5.

6. *Katna R., Suhaib M., Agrawal N.* Nonedible vegetable oil-based cutting fluids for machining processes – a review // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2020. – Vol. 35 (1). – P. 1–32. – DOI: 10.1080/10426914.2019.1697446.

7. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns / D.P. Adler, W.S. Hii, D.J. Michalek, J.W. Sutherland // *Machining Science and Technology.* – 2006. – Vol. 10 (1). – P. 23–58. – DOI: 10.1080/10910340500534282.

8. *Agrawal S.M., Patil N.G.* Experimental study of non edible vegetable oil as a cutting fluid in machining of M2 steel using MQL // *Procedia Manufacturing.* – 2028. – Vol. 20. – P. 207–212.

9. *Sankaranarayanan R., Krolczyk G.M.* A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges // *Journal of Manufacturing Processes.* – 2021. – Vol. 67. – P. 286–313. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.002.

10. *Sharif M.N., Pervaiz S., Deiab I.* Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2017. – Vol. 89. – P. 2447–2479. – DOI: 10.1007/s00170-016-9298-5.

11. Evaluation of crude watermelon oil as lubricant in cylindrical turning of AISI 1525 steel employing Taguchi and grey relational analyses techniques / R.A. Kazeem, D.A. Fadare, I.G. Akande, T.C. Jen, S.A. Akinlabi, E.T. Akinlabi // *Heliyon.* – 2024. – Vol. 10 (3). – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25349.

12. Machining performance on SS304 using nontoxic, biodegradable vegetable-based cutting fluids / J.E. Manikanta, B.N. Raju, C. Prasad, B.P. Sankar // *Chemical Data Collections.* – 2022. – Vol. 42. – DOI: 10.1016/j.cdc.2022.100961.

13. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils / Y. Wang, C. Li, Y. Zhang, M. Yang, B. Li, D. Jia, Y. Hou, C. Mao // *Journal of Cleaner Production.* – 2016. – Vol. 127. – P. 487–499. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.121.

14. *Shaikh J.B., Sidhu J.S.* Experimental investigation and optimization of process parameters in turning of AISI D2 steel using different lubricant // *International Journal of Engineering and Advanced Technology.* – 2014. – Vol. 3 (5). – P. 189–197.

15. *Puttaswamy J.T., Ramachandra J.S.* Experimental investigation on the performance of vegetable oil based

cutting fluids in drilling AISI 304L using Taguchi technique // *Tribology Online.* – 2018. – Vol. 13. – P. 60–66. – DOI: 10.2474/troll.13.60.

16. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil / B. Li, H. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, M. Yang // *Chinese Journal of Aeronautics.* – 2016. – Vol. 29 (4). – P. 1084–1095.

17. End milling of AISI 304 steel using minimum quantity lubrication / M.N. Babu, V. Anandan, N. Muthukrishnan, M. Santhanakumar // *Measurement.* – 2019. – Vol. 138 (2). – P. 681–689. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.064.

18. *Radhika A., Rao S., Yogesh K.B.* Evaluating machining performance of AISI 1014 steel using gingelly oil as cutting fluid // *Australian Journal of Mechanical Engineering.* – 2021. – Vol. 19 (4). – P. 445–456. – DOI: 10.1080/14484846.2019.1636517.

19. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy / S. Guo, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, B. Li, M. Yang, X. Zhang, G. Liu // *Journal of Cleaner Production.* – 2017. – Vol. 140 (3). – P. 1060–1076.

20. Nanofluids application in machining: a comprehensive review / X. Wang, Y. Song, C. Li, Y. Zhang, H.M. Ali, S. Sharma, R. Li, M. Yang, T. Gao, M. Liu, X. Cui // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2023. – Vol. 131 (5). – DOI: 10.1007/s00170-022-10767-2.

21. Nanoparticle enriched cutting fluids in metal cutting operation: a review / J.E. Manikanta, R.B. Naga, B.S.S. Phanisankar, M. Rajesh, T.K. Kotteda // *Recent Advances in Mechanical Engineering.* – Springer, 2023. – DOI: 10.1007/978-981-19-2188-9\_14.

22. *Nam J.S., Lee P.H., Lee S.W.* Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2011. – Vol. 51. – P. 649–652.

23. *Shen B., Shih A., Tung S.C.* Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding // *Tribology Transactions.* – 2008. – Vol. 51 (6). – P. 730–737.

24. *Vasu V., Reddy G.P.K.* Effect of minimum quantity lubrication with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining Inconel 600 alloy // *Journal of Nanoengineering and Nanosystems.* – 2011. – Vol. 225 (1). – P. 3–16.

25. Reinforced lubrication of vegetable oils with graphene additive in tapping ADC12 aluminum alloy / J. Ni, G. Feng, Z. Meng, T. Hong, Y. Chen, X. Zheng // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2018. – Vol. 94. – P. 1031–1040.

26. Experimental assessment of an environmentally friendly grinding process using nanofluid minimum quantity lubrication with cryogenic air / J. Zhang, C. Li, Y. Zhang, M. Yang // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 193. – P. 236–248.

27. *Manojkumar K., Ghosh A.* Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance // *Journal of*

*Materials Processing Technology*. – 2016. – Vol. 237. – P. 55–64.

28. *Manikanta J.E., Ambhore N. Nikhare C.* Application of sustainable techniques in grinding process for enhanced machinability: a review // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2024. – Vol. 46. – DOI: 10.1007/s40430-024-04801-5.

### Конфликт интересов

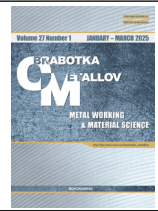
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)







## Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations



Javvadi Eswara Manikanta <sup>1, a</sup>, Nitin Ambhore <sup>2, b, \*</sup>, Gopala Rao Thellaputta <sup>3, c</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Shri Vishnu Engineering College for Women (A), Bhimavaram, Andhra Pradesh, 534202, India

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, SPPU, Maharashtra, Pune 411037, India

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, St. Ann's College of Engineering & Technology (Autonomous), Chirala, Andhra Pradesh, 523187, India

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0881-4899>,  [manijem66@gmail.com](mailto:manijem66@gmail.com); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8468-8057>,  [nitin.ambhore@viit.ac.in](mailto:nitin.ambhore@viit.ac.in);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5622-4140>,  [drtgopalarao@gmail.com](mailto:drtgopalarao@gmail.com)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 11 November 2024

Revised: 25 November 2024

Accepted: 17 December 2024

Available online: 15 March 2025

#### Keywords:

Vegetable oils

Nanofluids

High-Speed machining

Environmental sustainability

### ABSTRACT

**Introduction.** Currently, the use of vegetable oil-based cutting fluids with nanoparticles is being implemented in turning operations. These fluids provide a sustainable and high-performance solution by improving lubrication, cooling, and surface quality. The use of vegetable oil-based cutting fluids with nanoparticles also promotes an eco-friendly approach in the manufacturing industry. These fluids serve as an alternative to conventional cutting fluids, which are hazardous chemical mixtures that pose a risk to both the environment and the operator. **The purpose of the work.** The present study focuses on the use of cutting fluids based on environmentally friendly vegetable oils in the turning process. This work investigates the performance of turning  *AISI 1014*  steel with various nanoparticle combinations and ratios. **The methods of investigation.** In this study, five different vegetable oils — corn oil, coconut oil, sunflower oil, palm oil, and neem oil — were used as base fluid.  *CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,*  graphene, and powdered multi-walled carbon nanotubes were added to the base fluid to create nanofluids. Cutting fluids were developed with varying weight concentrations of 0.20 %, 0.40 %, 0.60 %, 0.80 %, and 1 %, and its performance when machining  *AISI 1014*  steel was investigated. **Results and Discussion.** The results indicated that, among the vegetable oils, corn oil had the greatest effect on viscosity and thermal conductivity. Graphene nanoparticles showed promising results in reducing cutting force, temperature, and surface roughness. When using corn oil containing 0.8 wt. % graphene nanoparticles, a 104 N reduction in cutting force was observed, this is 29.8 % less than that achieved with pure corn oil. At a high concentration (1 wt. %), the reduction in load decreases due to significant agglomeration of nanoparticles. The optimal nanoparticle concentration in the base fluid (corn oil) is 0.8 wt. %.

**For citation:** Manikanta J.E., Ambhore N., Thellaputta G.R. Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 20–33. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33. (In Russian).

### References

1. Ghosh S., Rao P.V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 100, pp. 17–34. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.039.
2. O'Sullivan D., Cotterell M. Temperature measurement in single point turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, vol. 118 (1–3), pp. 301–308. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00853-6.
3. Waydande R.P., Ghatge D.A. Performance evaluation of cutting parameters for surface roughness & power consumption in turning of 904l stainless steel using vegetable oil based cutting fluids. *Advanced Manufacturing and Materials Science: Selected Extended Papers of ICAMMS*. Springer, 2018, pp. 317–325. DOI: 10.1007/978-3-319-76276-0\_32.

#### \* Corresponding author

Ambhore Nitin, Ph.D. (Engineering), Assistant Professor  
 Vishwakarma Institute of Technology,  
 Pune - 411037, Maharashtra, India  
 Tel.: +91-2026950441, e-mail: [nitin.ambhore@viit.ac.in](mailto:nitin.ambhore@viit.ac.in)



4. Cetin M.H., Ozcelik B., Kuram E., Demirbas E. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 19, pp. 2049–2056. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013.
5. Manikanta J.E., Ambhore N., Nikhare C. Application of sustainable techniques in grinding process for enhanced machinability: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, vol. 46. DOI: 10.1007/s40430-024-04801-5.
6. Katna R., Suhaib M., Agrawal N. Nonedible vegetable oil-based cutting fluids for machining processes – a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, vol. 35 (1), pp. 1–32. DOI: 10.1080/10426914.2019.1697446.
7. Adler D.P., Hii W.S., Michalek D.J., Sutherland J.W. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns. *Machining Science and Technology*, 2006, vol. 10 (1), pp. 23–58. DOI: 10.1080/10910340500534282.
8. Agrawal S.M., Patil N.G. Experimental study of non edible vegetable oil as a cutting fluid in machining of M2 steel using MQL. *Procedia Manufacturing*, 2028, vol. 20, pp. 207–212.
9. Sankaranarayanan R., Krolczyk G.M. A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 67, pp. 286–313. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.002.
10. Sharif M.N., Pervaiz S., Deiab I. Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 89, pp. 2447–2479. DOI: 10.1007/s00170-016-9298-5.
11. Kazeem R.A., Fadare D.A., Akande I.G., Jen T.C., Akinlabi S.A., Akinlabi E.T. Evaluation of crude watermelon oil as lubricant in cylindrical turning of AISI 1525 steel employing Taguchi and grey relational analyses techniques. *Heliyon*, 2024, vol. 10 (3). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25349.
12. Manikanta J.E., Raju B.N., Prasad C., Sankar B.P. Machining performance on SS304 using nontoxic, biodegradable vegetable-based cutting fluids. *Chemical Data Collections*, 2022, vol. 42. DOI: 10.1016/j.cdc.2022.100961.
13. Wang Y., Li C., Zhang Y., Yang M., Li B., Jia D., Hou Y., Mao C. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 127, pp. 487–499. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.121.
14. Shaikh J.B., Sidhu J.S. Experimental investigation and optimization of process parameters in turning of AISI D2 steel using different lubricant. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2014, vol. 3 (5), pp. 189–197.
15. Puttaswamy J.T., Ramachandra J.S. Experimental investigation on the performance of vegetable oil based cutting fluids in drilling AISI 304L using Taguchi technique. *Tribology Online*, 2018, vol. 13, pp. 60–66. DOI: 10.2474/troll.13.60.
16. Li B., Li H., Zhang Y., Wang Y., Jia D., Yang M. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, vol. 29 (4), pp. 1084–1095.
17. Babu M.N., Anandan V., Muthukrishnan N., Santhanakumar M. End milling of AISI 304 steel using minimum quantity lubrication. *Measurement*, 2019, vol. 138 (2), pp. 681–689. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.064.
18. Radhika A., Rao S., Yogesh K.B. Evaluating machining performance of AISI 1014 steel using gingelly oil as cutting fluid. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 19 (4), pp. 445–456. DOI: 10.1080/14484846.2019.1636517.
19. Guo S., Li C., Zhang Y., Wang Y., Li B., Yang M., Zhang X., Liu G. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 140 (3), pp. 1060–1076.
20. Wang X., Song Y., Li C., Zhang Y., Ali H.M., Sharma S., Li R., Yang M., Gao T., Liu M., Cui X. Nanofluids application in machining: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 131 (5). DOI: 10.1007/s00170-022-10767-2.
21. Manikanta J.E., Naga R.B., Phanisankar B.S.S., Rajesh M., Kotteda T.K. Nanoparticle enriched cutting fluids in metal cutting operation: a review. *Recent Advances in Mechanical Engineering*. Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-2188-9\_14.
22. Nam J.S., Lee P.H., Lee S.W. Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, vol. 51, pp. 649–652.

23. Shen B., Shih A., Tung S.C. Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding. *Tribology Transactions*, 2008, vol. 51 (6), pp. 730–737.

24. Vasu V., Reddy G.P.K. Effect of minimum quantity lubrication with  $Al_2O_3$  nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining Inconel 600 alloy. *Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 2011, vol. 225 (1), pp. 3–16.

25. Ni J., Feng G., Meng Z., Hong T., Chen Y., Zheng X. Reinforced lubrication of vegetable oils with graphene additive in tapping ADC12 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 1031–1040.

26. Zhang J., Li C., Zhang Y., Yang M. Experimental assessment of an environmentally friendly grinding process using nanofluid minimum quantity lubrication with cryogenic air. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 193, pp. 236–248.

27. Manojkumar K., Ghosh A. Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 237, pp. 55–64.

28. Manikanta J.E., Ambhore N., Nikhare C. Application of sustainable techniques in grinding process for enhanced machinability: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, vol. 46. DOI: 10.1007/s40430-024-04801-5.

## 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>).