



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Экспериментальное исследование наноСОЖ на основе оксида графена при сверлении композиционного алюмоматричного материала, армированного частицами SiC, в условиях минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости

Нилеш Патил^{1, a}, Сачин Агарвал^{2, b}, Атул Кулкарни^{3, c, *}, Атул Сараф^{4, d},
 Милинд Ране^{3, e}, Йогирадж Дама^{5, f}

¹ Технологический институт Маратвада, Аурангабад – 431010, штат Махараштра, Индия

² Институт инженерии и управления Деогири, Аурангабад – 431005, штат Махараштра, Индия

³ Технологический институт Вишвакарма, Пуна, Махараштра, 411037, Индия

⁴ Национальный технологический институт Сардара Валлабхаи, Иччанатх, Сурат – 395007, Гуджарат, Индия

⁵ Технологический университет доктора Бабасахеба Амбекарка, Лонере, Райгад, Махараштра, 402103, Индия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4884-4267>,  nileshgpatil@rediffmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4582-1745>,  sachinagarwal@dietms.org;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>,  atul.kulkarni@vit.edu; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-4776-6874>,  atul.saraf001@gmail.com;

^e  <https://orcid.org/0000-0001-5829-5305>,  milind.rane@vit.edu; ^f  <https://orcid.org/0009-0008-5404-4347>,  yogirajdama@dbatu.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787:621.895

История статьи:

Поступила: 12 января 2025

Рецензирование: 12 февраля 2025

Принята к печати: 17 марта 2025

Доступно онлайн: 15 июня 2025

Ключевые слова:

НаноСОЖ

NMQL (минимальное количество

смазочно-охлаждающей жидкости)

Оксид графена

Круглость

Высота заусенцев

Эмпирическое моделирование

АННОТАЦИЯ

Введение. Минимальное количество смазочно-охлаждающей жидкости (MQL) эффективно используется в качестве подходящей стратегии охлаждения. Однако в сравнении с широко распространенным в промышленности обильным охлаждением MQL характеризуется меньшей теплоотводящей способностью. В то время как при обильном охлаждении отмечаются случаи термического удара, применение MQL обеспечивает более плавный отвод стружки и снижает риск возникновения термических напряжений. **Методы исследования.** В рамках данного исследования проведены экспериментальные работы по сверлению металломатричного композита (MMC) на основе алюминия, армированного карбидом кремния (Al-SiC MMC), с использованием AlCrN-сверл с PVD-покрытием (диаметр сверла 8 мм). Образцы MMC изготавливались с различной объемной долей SiC (10–30 %). Целью экспериментов являлось изучение влияния пищевого растительного масла с добавлением оксида графена в качестве СОЖ на процесс сверления AlSiC MMC. В качестве входных параметров процесса варьировали скорость резания (30...150 м/мин), подачу (0,05...0,25 мм/об), объемную долю SiC (10–30 %) и расход MQL (60...180 мл/ч). Выходными параметрами служили сила резания, крутящий момент, шероховатость поверхности, круглость отверстия и высота заусенцев при высокоскоростном сверлении MMC. Параметры масла унди (александрианского лавра) определяли в соответствии со стандартом ASTM 6751. Морфология поверхности и элементный анализ оксида графена исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDAX). **Цель работы.** Использование наноСОЖ в сочетании с MQL является одним из перспективных подходов к дальнейшему улучшению характеристик MQL, особенно при сверлении труднообрабатываемых материалов. Введение наноматериалов в MQL способствует снижению трения на границе контакта инструмента и стружки, что приводит к уменьшению температуры резания. Данные методы позволяют облегчить механическую обработку легких и труднообрабатываемых материалов, в частности металломатричных композитов (MMC) на основе алюминия, широко применяемых в автомобильной и аэрокосмической отраслях. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что использование наночастиц оксида графена, диспергированных в пищевом масле унди, представляет собой перспективную альтернативу традиционным СОЖ при сверлении MMC. Целью исследования являлась разработка полуэмпирических моделей для прогнозирования шероховатости поверхности и температуры при различных составах MMC. Повышение эффективности резания достигается путем точного определения температуры в зоне обработки. Однако практическое определение температуры резания в каждом конкретном случае сопряжено со значительными трудовыми и финансовыми затратами. Дополнительно установлено, что наночастицы оксида графена, смешанные с пищевым маслом унди, представляют собой эффективную альтернативу традиционным СОЖ при сверлении MMC. В настоящей работе разработана комплексная эмпирическая формула для прогнозирования теоретической температуры и шероховатости поверхности. Выявлено, что основная часть мощности, потребляемой при механической обработке, преобразуется в теплоту.

Для цитирования: Экспериментальное исследование наноСОЖ на основе оксида графена при сверлении композиционного алюмоматричного материала, армированного частицами SiC, в условиях минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости / Н. Патил, С. Агарвал, А.П. Кулкарни, А. Сараф, М. Ране, Й.Б. Дама // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 103–125. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-103-125.

*Адрес для переписки

Кулкарни Атул П., профессор

Технологический институт Вишвакарма,

Пуна, Махараштра, 411037, Индия

Тел.: 91-2026950419, e-mail: atul.kulkarni@vit.edu

Список условных обозначений List of symbols

f	Подача, мм/об / Feed rate (mm/rev)
V_c	Скорость резания, м/мин / Cutting speed (m/min)
Q	Расход, мл/час / Flow Rate (ml/hr)
V_f	Объемная доля SiC, % / SiC Volume Fraction (%)
F_x	Осевая сила, Н / Thrust force (N)
T	Крутящий момент, Н·м / Torque (Nm)
Ra	Шероховатость поверхности, мкм / Surface roughness (μm)
Bh	Высота заусенцев, мм / Bur height (mm)
Cr	Круглость, мм / Circularity (mm)
RSM	Методология поверхности отклика / Response surface methodology
CCD	Центральный композиционный план / Central composite design

Введение

Основная функция смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) заключается в обеспечении охлаждения и смазки в зоне резания. Применение СОЖ способствует снижению износа инструмента, повышению качества обработанной поверхности и эффективному удалению стружки из зоны обработки, обеспечивая устойчивое протекание процесса резания. В связи с увеличением количества экологических проблем и ужесточением нормативных требований, касающихся загрязнения окружающей среды, наблюдается устойчивый рост спроса на возобновляемые и экологически безопасные СОЖ [1–4]. Концепция «устойчивого производства» предполагает создание продукции с использованием экологически чистых технологий и систем, а также с сохранением энергетических и природных ресурсов. Такая производственная модель должна быть экономически оправданной, безопасной и благоприятной для здоровья персонала [4–5].

При обработке труднообрабатываемых материалов тепловыделение вызывает такие проблемы, как термические трещины и погрешности размеров. Рассеивание тепла в станках обычно достигается за счет применения СОЖ. Однако растущая обеспокоенность заставила правительства и связанные с ними организации вве-

сти строгие правила и руководства для контроля использования, переработки и утилизации СОЖ. Следовательно, промышленность стремится перейти от мокрого способа охлаждения к более экономичным и экологически безопасным альтернативам. К этим вариантам относятся MQL (обработка с минимальным количеством смазки), применение экологически чистых СОЖ, наноСОЖ, обработка без СОЖ и др. [6–10]. Технология обработки с MQL представляет собой перспективную альтернативу, при которой в зону резания через форсунку подается минимально необходимое количество СОЖ. При реализации обработки с MQL СОЖ подается в зону резания либо в виде отдельных капель, либо в виде масляного тумана, формируемого путем распыления СОЖ сжатым воздухом.

Технология обработки с MQL активно исследуется многими научными коллективами [11, 12]. В качестве экологически предпочтительных СОЖ при обработке с MQL часто используются растительные масла, обладающие высокой биоразлагаемостью, возобновляемостью и отличными смазывающими свойствами [13–15]. В ряде работ показано, что непищевые растительные масла по своим эксплуатационным характеристикам превосходят традиционные минеральные масла, которые применяются при механической обработке, благодаря формированию на обрабатываемой поверхности прочной межмолекулярной границы, обеспечивающей высокую смазывающую способность. В качестве перспективных альтернатив традиционным СОЖ рассматриваются такие непищевые масла, как масло нима, масло каранджи, масло ятрофы, касторовое масло и масло семян хлопчатника, обладающие требуемой функциональностью [16–19].

В работах [16–19] были использованы наночастицы Al_2O_3 со средним размером 20 нм, диспергированные в соевом масле (объемная концентрация 1,5 %). Результаты испытаний показали, что применение NMQL (nanoMQL) позволяет снизить мощность трения в зонах контакта инструмента со стружкой и инструмента с заготовкой, что обусловлено эффектом качения наночастиц и улучшением теплоотвода. Кроме того, применение наноСОЖ при обработке в условиях MQL эффективно способствует удалению стружки и заусенцев, что улучшает качество обработанной поверхности отверстий

и повышает стойкость инструмента благодаря снижению износа [20–22].

Содавадиа и Маквана (Sodavadia и Makwana) [23] исследовали возможность применения нанодисперсной борной кислоты в кокосовом масле при точении аустенитной нержавеющей стали марки AISI 304 твердосплавным инструментом. В качестве базового смазывающего вещества использовалось кокосовое масло, в котором были суспендированы наночастицы борной кислоты (средний размер частиц 50 нм). В работе были установлены закономерности изменения среднего износа задней поверхности инструмента, шероховатости обработанной поверхности и температуры режущего инструмента в зависимости от режимов резания (скорости резания и подачи) при использовании нанодисперсных суспензий борной кислоты в кокосовом масле. Анализ данных из литературы показывает, что применение наночастиц в процессах механической обработки, в частности при сверлении, оказывает положительное влияние на процесс резания благодаря интенсификации процессов смазки и охлаждения. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных использованию различных наночастиц в сочетании с растительными и минеральными СОЖ, в литературе практически отсутствуют данные об использовании наночастиц оксида графена в непищевом растительном масле, таком как масло унди [23–25].

Оксид графена – это перспективный материал, получаемый из синтетического графитового порошка. Он характеризуется превосходными механическими и теплофизическими свойствами, что обуславливает его широкое применение в различных областях, таких как солнечная энергетика, сенсорные экраны и биосенсоры. Одной из наиболее примечательных характеристик оксида графена является его высокая теплопроводность, достигающая 5800 Вт/(м·К). Благодаря этому наночастицы оксида графена могут эффективно использоваться в качестве компонента смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) при обработке труднообрабатываемых материалов, таких как металломатричные композиты (Metal Matrix Composites, MMC) [26, 27].

Настоящее исследование посвящено изучению эффективности наноСОЖ на основе оксида графена, которые применяются при обработке

в условиях минимального количества смазки (MQL), используемых в автомобильной и авиакосмической промышленности. В рамках текущего исследования наночастицы оксида графена диспергировали в масле унди. Целью работы является оценка влияния наночастиц оксида графена на процесс сверления MMC при реализации различных условий охлаждения. Эффективность процесса оценивали по следующим параметрам: осевая сила, крутящий момент, шероховатость обработанной поверхности, круглость отверстия и высота заусенцев. Исследование посвящено установлению влияния добавления наноматериалов в СОЖ на процессы, протекающие в зоне контакта инструмента и стружки, и на снижение температуры резания. Особое внимание уделяется изучению закономерностей обработки легких и труднообрабатываемых материалов, в частности металломатричных композитов (MMC) на основе алюминия.

Экспериментальные исследования проводили на оборудовании, имеющемся в распоряжении кафедры машиностроения Технологического института Вишвакарма (VIIT), г. Пуна, штат Махараштра, Индия. В частности, использовались станок с ЧПУ, система MQL, режущий инструмент и установка для измерения шероховатости поверхности.

Методика исследования

Алюмоматричные композиты (АМК) представляют собой перспективные материалы для широкого спектра областей применения, что обусловлено их улучшенными физико-механическими характеристиками. Введение упрочняющих компонентов в металлическую матрицу позволяет повысить жесткость, удельную прочность и износостойкость по сравнению с традиционными материалами. MMC на основе алюминия находят применение в авиационной, аэрокосмической, автомобильной промышленности и других областях. Однако обработка этих материалов резанием сопряжена с трудностями из-за абразивных свойств упрочняющих частиц. В связи с этим в качестве материала для заготовки в данном исследовании были выбраны MMC на основе алюминия, упрочненные частицами карбида кремния (SiC). Свойства обрабатываемых материалов, использованных в эксперименте, представлены в табл. 1.

Свойства обрабатываемых материалов
Properties of the machined materials

Workpiece / Образец	Properties / Свойства				
	Коэффициент термического расширения, K^{-1} / Thermal coefficient of expansion (K^{-1})	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) / Specific heat, (J/kg·K)	Теплопроводность (Вт/(м·К)) / Thermal conductivity, (W/ m·K)	Плотность, кг/м ³ / Den- sity, (kg/m ³)	Температура плавления, К / Melting point, (K)
Al/SiC _p /10 %	20,7	879	156	2,710	828
Al/SiC _p /20 %	17,46	837	150	2,765	828
Al/SiC _p /30 %	14,58	795	144	2,798	828

Микроструктура MMC Al-SiC, полученная методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при увеличении 300×, приведена на рис. 1. На рис. 2, *а* и *б* показаны пластина из MMC Al-SiC и твердосплавное сверло с PVD-покрытием, используемое в исследовании. Тип твердосплавного сверла с PVD-покрытием – SD1105A-0680-043-08R1, угол при вершине составляет 140°, а диаметр – 8 мм. Сверло покрыто полированным слоем AlCrN. Покрытие AlCrN характеризуется высокой абразивной стойкостью, твердостью и адгезией, а также способствует эффективному отводу стружки [27].

Операция сверления выполнялась на вертикальном обрабатывающем центре (серия BMV 60+), обеспечивающем высокую точность и стабильную производительность при высокой подаче и скорости резания. На рис. 3, *а* представлен

беспроводной датчик силы Spike с держателем инструмента. Этот датчик, интегрированный в держатель, использовался для измерения силы резания, крутящего и изгибающего моментов непосредственно в зоне обработки. Данные передавались по беспроводной сети на приемник. Специализированное программное обеспечение осуществляло обработку данных и визуализацию результатов.

Как показано на рис. 3, *б*, система минимального количества смазки (MQL), примененная в эксперименте, включает в себя два входных канала и один выходной, объединяющиеся в камере смешивания. Один из входных каналов подключен к воздушному компрессору, а другой – к емкости с разработанной нано-смазочно-охлаждающей жидкостью. За счет давления сжатого воздуха масло из емкости подается в виде

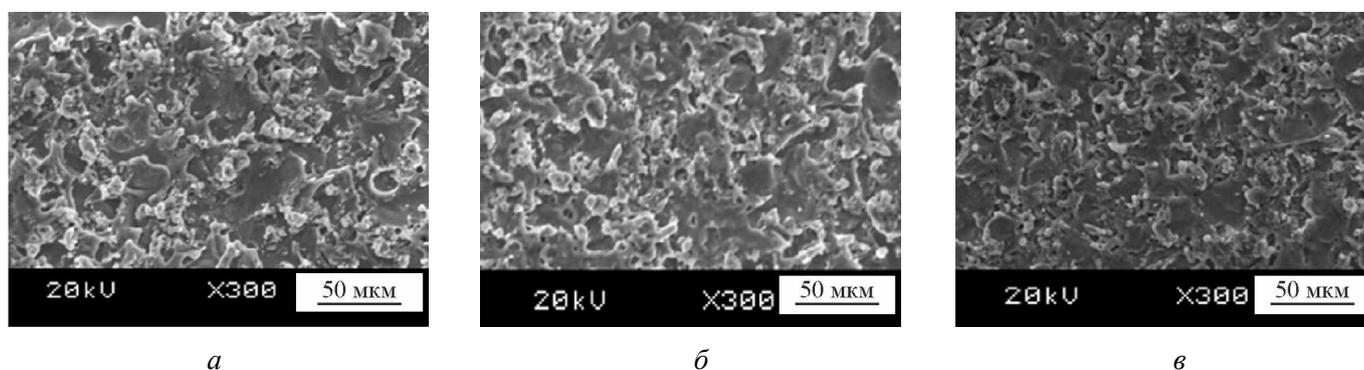


Рис. 1. SEM-микрофотографии Al/SiC MMC при объемной доле SiC:

а – 10 %; *б* – 20 %; *в* – 30 %

Fig. 1. SEM micrographs of Al/SiC MMC at SiC volume fractions of:

а – 10 %; *б* – 20 %; *в* – 30 %

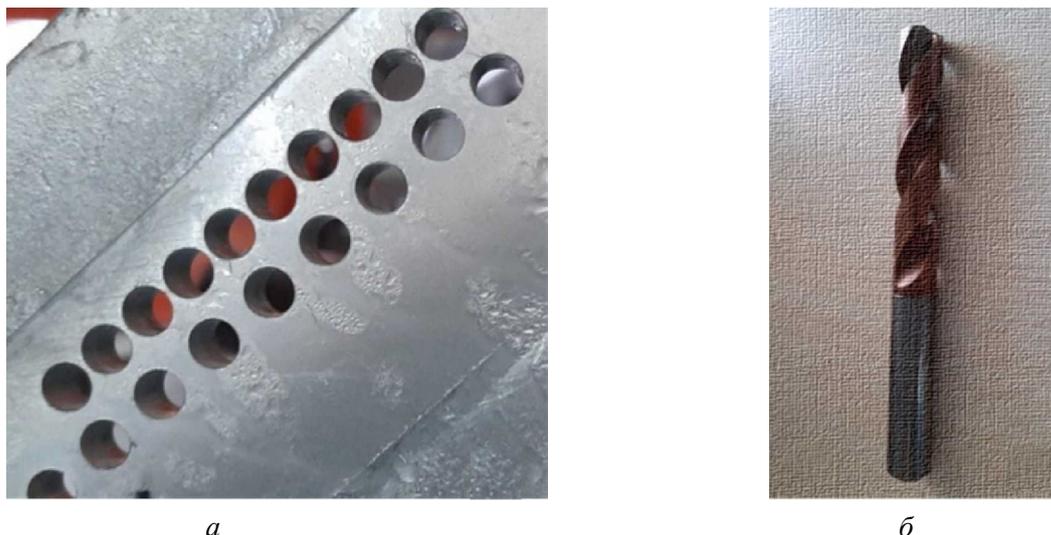


Рис. 2. Образец материала Al-SiC MMC (а) и сверло с покрытием AlCrN (PVD) (б)
 Fig. 2. Al-SiC MMC workpiece material (a) and AlCrN (PVD) coated drill (б)

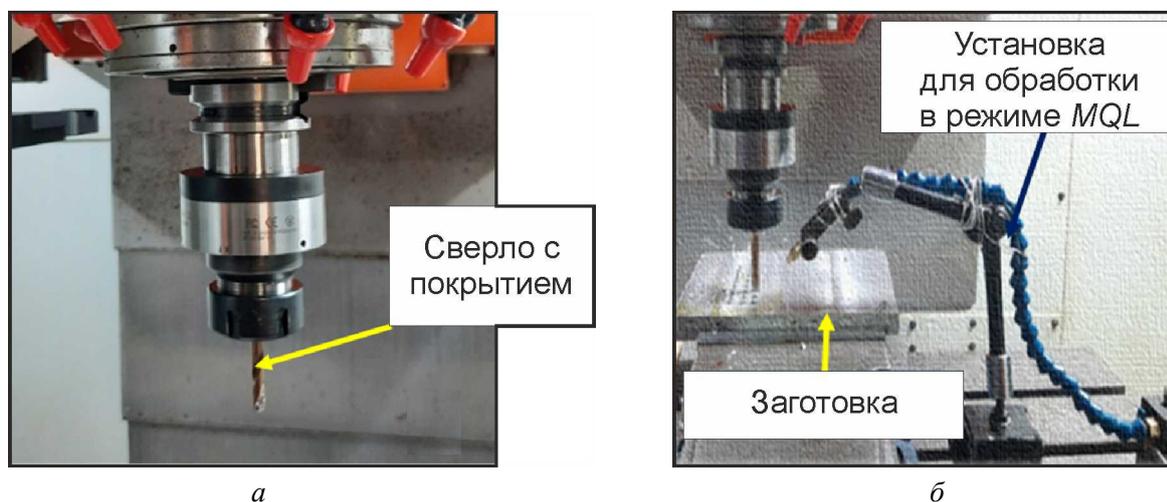


Рис. 3. Беспроводной держатель инструмента (а) и установка MQL (б)
 Fig. 3. Wireless tool holder (a) and MQL setup (б)

тумана через выходной канал. Эксперименты по сверлению проводили для различных комбинаций параметров процесса.

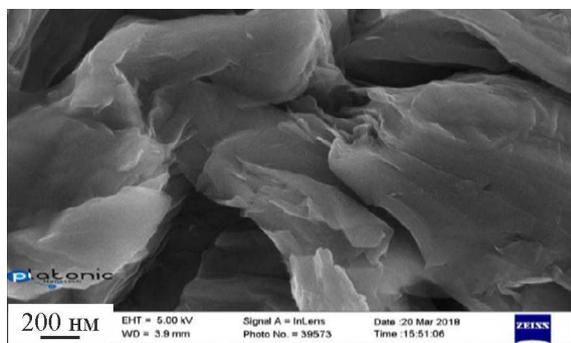
Выбор масла унди в качестве СОЖ для обработки металлов обусловлен его потенциальными преимуществами для окружающей среды и сельского хозяйства. Масло унди сохраняет свои свойства на протяжении длительного времени (до 50 лет) и не конкурирует с маслами продовольственных культур. Масло унди характеризуется более высоким выходом, вязкостью и температурой вспышки, чем другие растительные масла, такие как масла яatroфы, нима, гевеи, хлопчатника, понгамии перистой и др. Характеристики масла унди, определенные в соот-

ветствии со стандартом ASTM 6751, приведены в табл. 2.

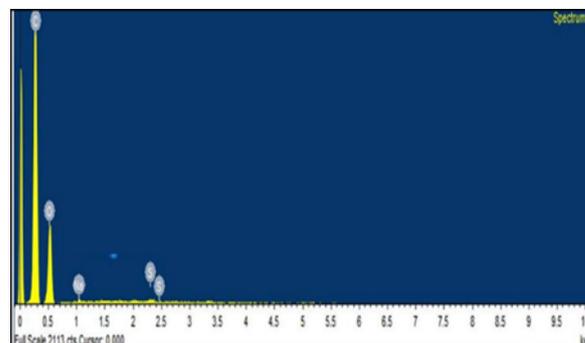
Для получения базовой жидкости (охлаждающей жидкости) масло унди смешивали с наночастицами оксида графена. Структура оксида графена была исследована методом полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии (FESEM), результаты представлены на рис. 4, а. Анализ показал, что поперечный размер частиц оксида графена составляет приблизительно 10 нм. Элементный состав оксида графена был определен с помощью энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDAX). Графики EDAX (рис. 4, б) подтвердили наличие ионов углерода (C) и кислорода (O) в требуемом

Свойства масла унди (александрианского лавра)
Properties of Undi Oil

Описание испытания / Test Description	Плотность, г/см ³ / Density (g/c ³)	Температура вспышки, °C / Flash point (°C)	Температура воспламенения, °C / Fire point (°C)	Вязкость, сСт / Viscosity (Cst)	Теплопроводность Вт/(м·К) / Thermal conductivity (W/m K)	Диапазон pH / Ph range
ASTM 6751	D1148	D93	D93	D445	D2709	–
Масло унди (александрианского лавра) / Undi oil	0,91	152	162	38,16	164...168	6,7



а



б

Рис. 4. Изображение оксида графена, полученное методом FESEM (а), и результаты элементного анализа оксида графена (EDAX) (б)

Fig. 4. FESEM image of graphene oxide (а) and EDAX plots of graphene oxide (б)

стехиометрическом соотношении. Свойства оксида графена приведены в табл. 3.

Наночастицы оксида графена размером 10 нм были выбраны для приготовления наноСОЖ благодаря их потенциалу и улучшенным свойствам. Для приготовления образца наноСОЖ 4 грамма оксида графена (в форме наночастиц)

смешивали с 200 мл масла унди (в качестве базовой жидкости). Концентрация наночастиц оксида графена в масле унди составляла 2 м/об %. Полученная смесь непрерывно перемешивалась на магнитной мешалке в течение 24 часов, а затем подвергалась ультразвуковой обработке в течение двух часов (рис. 5).

Свойства оксида графена
Properties of graphene oxide

Параметр / Specifications	Чистота / Purity	Толщина / Thickness	Поперечный размер / Lateral Dimension	Количество слоев / Number of Layer	Удельная площадь поверхности / Surface Area
Значение / Values	> 99 %	1...5 нм	5...10 мкм	В среднем 4–8	210 м ² /г



Рис. 5. Ультразвуковая обработка, применяемая для получения нано-смазочно-охлаждающей жидкости

Fig. 5. Ultrasonication process for preparation of nano cutting fluid

Для планирования экспериментов применяли методологию поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM). Целью являлась оптимизация показателей, характеризующих процесс резания (откликов), в зависимости от независимых переменных (параметров процесса). В качестве параметров процесса были выбраны скорость резания, подача, расход СОЖ и объемная доля SiC в материале. В качестве откликов рассматривались осевая сила резания, крутящий момент, шероховатость обработанной поверхности, высота заусенцев и отклонение формы отверстия от окружности (круглость). Значения параметров процесса выбирались на основании анализа данных из литературы и результатов предварительных экспериментов. Диапазоны значений параметров процесса, использованных в экспериментах, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Table 4

Параметры и уровни обработки
Machining parameters and levels

Уровень / Levels	-2	-1	0	+1	+2
Скорость резания (V_c), м/мин / Cutting speed (V_c) (m/min)	30	60	90	120	150
Скорость подачи (f), мм/об / Feed rate (f) (mm/rev)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
Расход (Q), мл/ч / Flow rate (Q) (ml/hr)	60	90	120	150	180
Объемная доля SiC (V_p), % / SiC vol. fraction (V_p) (%)	10	10	20	30	30

Результаты и их обсуждение

На вертикальном обрабатывающем центре (VMC) была проведена серия экспериментов, в которых варьировали скорость резания, подачу, расход СОЖ и объемную долю упрочняющей фазы. Для планирования основных экспериментов использовался центральный композиционный план (CCD), являющийся частью методологии поверхности отклика (RSM). Результаты экспериментов представлены в табл. 5. Для оценки статистической значимости влияния факторов применялся дисперсионный анализ (ANOVA). Достоверность полученных результатов оценивалась на основе F -критерия и p -уровня значимости (p -value). Адекватность разработанной модели оценивалась с помощью коэффициента детерминации (R^2).

Целью экспериментального исследования являлось выявление наиболее значимых факторов, влияющих на исследуемые параметры процесса резания (отклики), а также разработка обобщенной эмпирической модели для прогнозирования осевой силы резания, крутящего момента, шероховатости обработанной поверхности, высоты заусенцев и отклонения от круглости обработанного отверстия. Методологию поверхности отклика (RSM) использовали для анализа взаимосвязи между параметрами процесса и откликами. Поверхности отклика, построенные на основе RSM, позволяют оценить влияние каждого параметра процесса на определенный отклик при фиксированных значениях остальных параметров. Визуализация взаимосвязи между параметрами процесса и откликами осуществлялась

**Экспериментальные результаты, полученные при условиях минимальной подачи
смазочно-охлаждающей жидкости (MQL)**

Experimental results during NMQL condition

№ п/п / Seq. No.	Параметры процесса / Process Parameters				Отклики / Responses				
	V_c	f	Q	V_f	F_x	T	Ra	Cr	Bh
	м/мин m/min	мм/об mm/rev	мл/ч ml/h	%	N	Н·м N·m	мкм μm	мм mm	мм mm
1	60	0,1	90	10	282,58	0,783	0,806	0,0287	0,0021
2	120	0,1	90	10	324,21	0,882	0,710	0,0178	0,0436
3	60	0,2	90	10	579,48	1,318	1,784	0,0496	0,0022
4	120	0,2	90	10	577,29	1,282	0,687	0,0300	0,0000
5	60	0,1	150	10	882,81	2,579	2,944	0,0427	0,2926
6	120	0,1	150	10	824,56	2,832	1,326	0,1490	0,3922
7	60	0,2	150	10	1166,5	3,076	2,120	0,0971	0,3675
8	120	0,2	150	10	1059,25	3,114	1,651	0,1385	0,2852
9	60	0,1	90	30	656,62	1,781	2,571	0,1949	0,0800
10	120	0,1	90	30	786,55	1,893	0,075	0,2048	0,1350
11	60	0,2	90	30	1276,03	3,054	0,081	0,1991	0,1827
12	120	0,2	90	30	1206,18	2,688	0,084	0,2059	0,1495
13	60	0,1	150	30	1179,84	3,413	0,089	0,1731	0,2583
14	120	0,1	150	30	1228,36	3,196	0,101	0,1880	0,2706
15	60	0,2	150	30	1534,67	4,604	0,084	0,1873	0,3451
16	120	0,2	150	30	1440,98	3,602	0,224	0,2123	0,3165
17	30	0,15	120	20	953,49	4,131	0,671	0,2559	0,4131
18	150	0,15	120	20	1383,82	4,137	0,921	0,1624	0,332
19	90	0,05	120	20	917,38	3,594	0,208	0,0629	0,5020
20	90	0,25	120	20	1353,33	4,558	0,559	0,1678	0,3343
21	90	0,15	60	20	1186,69	4,363	1,907	0,1621	0,4622
22	90	0,15	180	20	1215,34	4,264	1,505	0,1688	0,4703
23	90	0,15	120	10	1025,96	2,91	2,571	0,1064	0,3380
24	90	0,15	120	30	1389,17	4,215	0,369	0,2225	0,4062
25	90	0,15	120	20	1197,34	4,385	2,122	0,2242	0,4340
26	90	0,15	120	20	1229,32	4,299	1,401	0,1498	0,4634
27	90	0,15	120	20	1253,25	4,406	1,535	0,1522	0,4382
28	90	0,15	120	20	1290,29	4,704	1,578	0,1380	0,5263
29	90	0,15	120	20	1284,21	4,862	1,211	0,0891	0,3630
30	90	0,15	120	20	1275,76	4,881	2,091	0,0817	0,3763
31	90	0,15	120	20	1284,96	4,689	0,921	0,0727	0,4222

с использованием трехмерных графиков поверхностей отклика.

На основании полученных результатов для исследуемых характеристик процесса резания (откликов) разработаны модели поверхности отклика, представленные ниже в виде уравнений:

$$F_x = -3386,81 + 13,4633V_c + 11\,380,1F + 21,2839Q + 114,253V_f - 18,1171V_cF - 0,021541V_cQ + 0,0293687V_cV_f - 20,9663FV_f - 0,148144QV_f - 0,0428178V_c^2 - 18\,744,4F^2 - 0,0338289Q^2 - 2,17802V_f^2; \quad (1)$$

$$T = -14,04 + 0,057358V_c + 33,1715F + 0,0687884Q + 0,758479V_f - 0,0672083V_cF - 5,11806e - 05V_cQ - 0,000380625V_cV_f - 0,026125FQ + 0,243875FV_f - 0,000403542QV_f - 0,000194778V_c^2 - 75,9202F^2 - 0,000144917Q^2 - 0,0164664V_f^2; \quad (2)$$

$$Ra = -1,19377 - 0,00410337V_c + 25,6013F + 0,000873283Q + 0,189131V_f + 0,115625V_cF + 0,000121597V_cQ + 0,000195625V_cV_f + 0,0477083FQ - 0,352375FV_f - 0,00132646QV_f - 0,000215872V_c^2 - 118,964F^2 + 3,69053Q^2 - 0,00138445V_f^2; \quad (3)$$

$$Cr = -0,0466403 - 0,00409958V_c + 1,35925F - 0,000901806Q + 0,0216226V_f - 0,002775V_cF + 1,39861e - 05V_cQ - 1,2625e - 05QV_f + 0,0018333305V_c^2 - 3,23667F^2 + 4,92593e - 06Q^2 - 0,000124167V_f^2; \quad (4)$$

$$Bh = -1,59316 + 0,00839594V_c + 2,24223F + 0,00683264Q + 0,0923996V_f - 0,0147708V_cF - 4,1875V_cQ - 0,000134604QV_f - 3,11267V_c^2 - 6,64562F^2 - 5,09895Q^2 - 0,00197624V_f^2. \quad (5)$$

Адекватность разработанных моделей была оценена с использованием коэффициента детерминации (R^2). Полученные значения R^2 для осевой силы, крутящего момента, шероховатости поверхности, высоты заусенцев и круглости составили 0,9610, 0,9423, 0,9733, 0,9570 и 0,9640 соответственно. Высокие значения R^2 указывают на хорошее соответствие между экспериментально измеренными и предсказанными значениями, подтверждая адекватность разработанных моделей для описания исследуемых процессов.

Осевая сила, возникающая в процессе сверления, является реакцией материала заготовки на внедрение сверла. В рамках экспериментального исследования сверления композиционного материала Al-SiC на алюминиевой матрице (MMC Al-SiC) были получены и задокументированы данные об осевой силе в зависимости от параметров резания в соответствии с разработанным планом эксперимента (Design of Experiments, DOE). Сверление представляет собой сложный процесс, характеризующийся одновременным воздействием осевой силы (направленной вдоль оси инструмента) и крутящего момента (действующего вокруг оси инструмента). В научной литературе отмечается, что осевая сила оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности заготовки, это обусловлено различиями в характеристиках изгиба матрицы и упрочняющих волокон. Осевая сила может быть использована в качестве индикатора, отражающего взаимодействие инструмента и заготовки. Изменения осевой силы могут свидетельствовать об изменении состояния режущей кромки вследствие деформации, износа инструмента, а также о взаимодействии инструмента с зоной термического влияния в зоне обработки [24].

Анализ зависимости осевой силы F_x от исследуемых параметров (рис. 6) выявил следующие закономерности. Минимальные значения осевой силы F_x наблюдаются при объемной доле V_f SiC, равной 10 %, в то время как увеличение объемной доли V_f SiC приводит к возрастанию осевой силы F_x (рис. 6, а). Аналогично увеличение подачи f сопровождается ростом осевой силы F_x (рис. 6, а). Анализ влияния расхода смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ Q) показал, что максимальная осевая сила F_x наблюдается при расходе СОЖ $Q = 150$ мл/ч и подаче

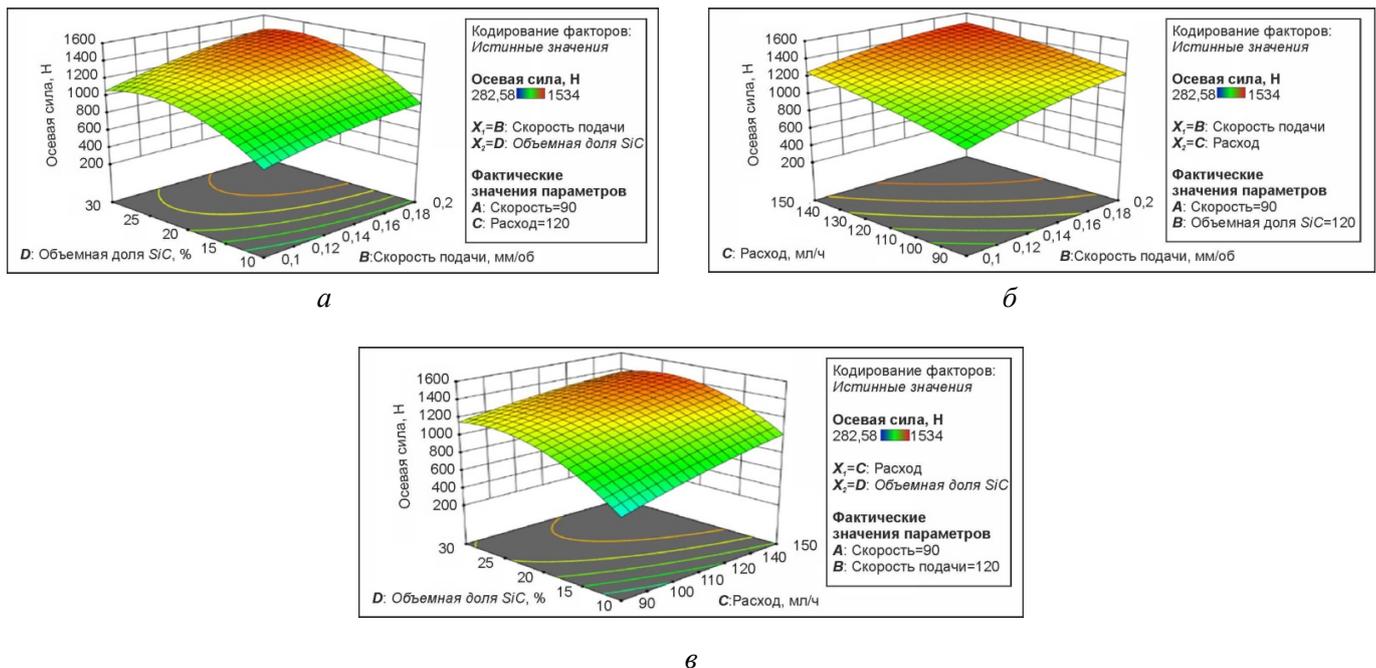


Рис. 6. Влияние скорости резания, подачи, объемной доли SiC и расхода смазочно-охлаждающей жидкости на осевую силу при использовании минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости (NMQL)

Fig. 6. Effect of cutting speed, feed, sic volume fraction and flow rate on thrust force under NMQL conditions

$f = 0,2$ мм/об, а минимальная – при 90 мл/ч и 0,1 мм/об (рис. 6, б). Кроме того, установлено, что максимальная осевая сила F_x достигается при расходе СОЖ $Q = 150$ мл/ч и объемной доле V_f SiC, равной 30 % (рис. 6, в). В целом увеличение расхода СОЖ Q и объемной доли V_f SiC приводит к возрастанию осевой силы F_x . При этом наиболее интенсивный рост осевой силы F_x наблюдается при увеличении объемной доли V_f SiC от 10 до 20 %, в то время как дальнейшее увеличение объемной доли V_f SiC (от 20 до 30 %) оказывает менее выраженное влияние на осевую силу F_x .

На рис. 6, а и б четко прослеживается взаимосвязь между подачей и осевой силой: увеличение подачи f с 0,1 до 0,2 мм/об приводит к значительному возрастанию осевой силы F_x . Эти результаты согласуются с данными, представленными в работе Гаитонде с соавторами (Gaitonde et al.) [11]. Аналогично рис. 6, а и в демонстрируют рост осевой силы F_x при увеличении объемной доли V_f SiC от 10 до 30 %, при этом, как и отмечалось ранее, увеличение объемной доли V_f SiC от 20 до 30% не приводит к столь значительному росту осевой силы F_x . Это наблюдение также находит подтверждение в работе Гаитонде с соавторами (Gaitonde et al.) [12]. Сравнительный анализ рис. 6, б и в показывает,

что минимальные значения осевой силы соответствуют низкому расходу СОЖ Q (90 мл/ч), а максимальные – высокому расходу СОЖ Q (150 мл/ч).

Подобно осевой силе, крутящий момент T оказывает существенное влияние на качество формируемого отверстия. В процессе сверления острые режущие кромки инструмента подвергаются износу, что приводит к увеличению трения и преобладанию истирания над резанием [18].

Влияние параметров процесса на крутящий момент T представлено на рис. 7. Результаты анализа показывают, что увеличение объемной доли V_f SiC с 10 до 30 % приводит к возрастанию крутящего момента T (рис. 7, а). Однако после достижения 20 % объемной доли V_f SiC наблюдается небольшое снижение крутящего момента T . Минимальное значение крутящего момента T наблюдается при комбинации низкой подачи f и расхода СОЖ Q (90 мл/ч и 0,1 мм/об), а максимальное – при 150 мл/ч и 0,2 мм/об (рис. 7, а). На рис. 7, б также продемонстрировано возрастание крутящего момента при увеличении подачи с 0,1 до 0,2 мм/об.

Шероховатость поверхности представляет собой важный параметр, характеризующий мелкомасштабные микронеровности текстуры поверхности. Согласно общепринятой класси-

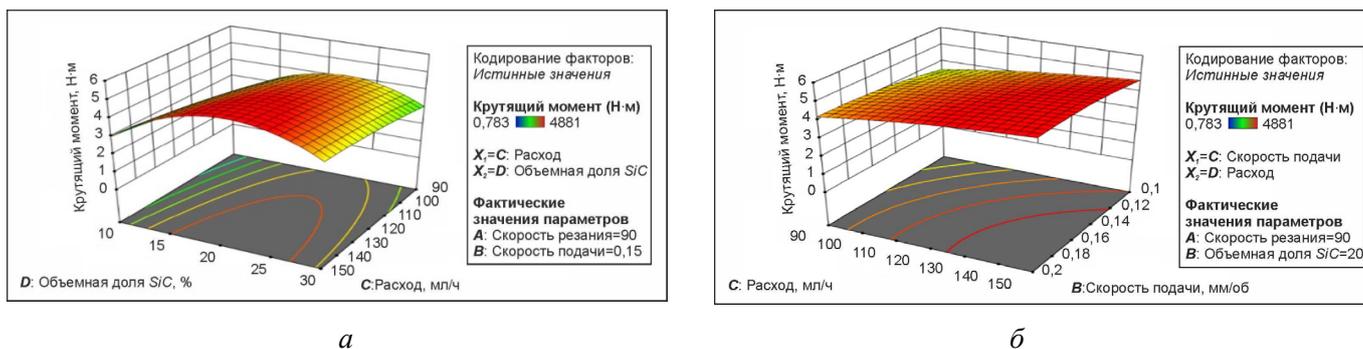


Рис. 7. Влияние скорости резания, подачи, объемной доли SiC и расхода смазочно-охлаждающей жидкости на крутящий момент при использовании минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости (NMQL)

Fig. 7. Effect of cutting speed, feed, SiC volume fraction and flow rate on torque under NMQL conditions

фикации, текстура поверхности состоит из трех основных компонентов: шероховатости, волнистости и формы [24]. Оценка шероховатости поверхности позволяет количественно определить качество обработки и оценить неровности, возникающие на поверхности заготовки в результате производственного процесса. Наиболее распространенным параметром для характеристики шероховатости является средняя шероховатость (R_a), широко используемая в различных отраслях промышленности.

Шероховатость поверхности – один из критических аспектов качества отверстия. Повышенная шероховатость внутренней поверхности отверстий может приводить к интенсификации процессов износа и усталости материала, что оказывает непосредственное влияние на эффективность производственного процесса и, как следствие, на итоговую стоимость производства [21]. Таким образом, шероховатость поверхности играет ключевую роль в производственном секторе и является важным показателем, используемым для оценки точности обработки [22]. Оптимизация шероховатости поверхности – важная задача для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик изделия.

На рис. 8 представлены результаты исследования влияния параметров процесса сверления на шероховатость поверхности (R_a). Анализ рис. 8, а показывает, что максимальная шероховатость поверхности наблюдается при объемной доле V_f SiC = 10 % с последующим резким снижением R_a при увеличении объемной доли V_f SiC до 30 %. Кроме того, наблюдается рост R_a при увеличении подачи f с 0,1 до 0,2 мм/об. Рис. 8, б демонстрирует возрастание R_a при увеличении

расхода СОЖ Q с 90 до 150 мл/ч. Наибольшее значение R_a зарегистрировано при комбинации низкой объемной доли V_f SiC и высокого расхода СОЖ Q (10 % и 150 мл/ч, соответственно), в то время как минимальное значение R_a соответствует высокой объемной доле V_f SiC и высокому расходу СОЖ Q . На рис. 8, в показано, что максимальное значение R_a наблюдается при объемной доле V_f SiC = 10 % и R_a резко уменьшается при увеличении объемной доли V_f SiC до 30 %. Кроме того, установлено, что максимальное значение R_a достигается при скорости резания $V_c = 60$ м/мин, а минимальное – при $V_c = 120$ м/мин.

Сопоставление данных, представленных на рис. 8, а, показывает, что увеличение подачи f с 0,1 до 0,2 мм/об приводит к незначительному росту R_a . Более низкие значения подачи f способствуют снижению осевой силы F_x во время сверления, что, как отмечается в работе [2], является одним из факторов, обеспечивающих более высокое качество поверхности при сверлении. Из рис. 8, б очевидно, что R_a достигает максимального значения при V_f SiC = 10 % и минимального при V_f SiC = 30 %. Полученные результаты согласуются с данными, представленными Гаитонде с соавторами (Gaitonde et al.) [12], которые показали, что увеличение V_f приводит к снижению R_a , что может быть связано с повышением хрупкости материала и последующим разрушением образовавшегося ранее нароста на режущей кромке (Built-Up Edge, BUE) при обработке композиционных материалов. Кроме того, рис. 8, б показывает, что увеличение расхода СОЖ Q с 90 до 150 мл/ч приводит к увеличению R_a . Данное наблюдение может

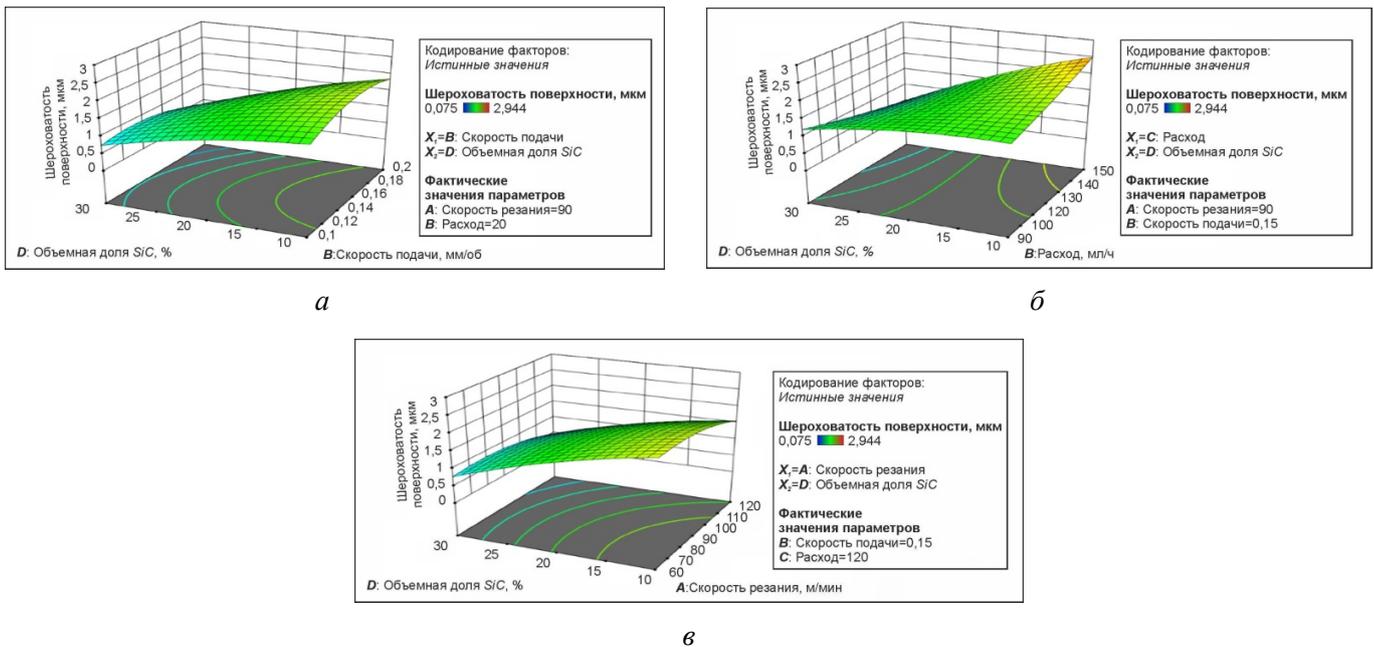


Рис. 8. Влияние скорости резания, подачи, объемной доли SiC и расхода смазочно-охлаждающей жидкости на шероховатость поверхности при использовании минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости (NMQL)

Fig. 8. Effect of cutting speed, feed rate, SiC volume fraction and flow rate on surface roughness under NMQL conditions

быть связано с тем, что при низком расходе СОЖ Q обработка в режиме MQL (Minimum Quantity Lubrication) обеспечивает более высокое качество поверхности при сверлении. Вероятно, в условиях низкого расхода СОЖ Q происходит снижение активности образования нароста на режущей кромке инструмента из-за воздействия тумана на границе раздела «инструмент – заготовка». Наконец, рис. 8, в демонстрирует, что при увеличении скорости резания V_c с 60 до 120 м/мин наблюдается снижение Ra . Такая тенденция может быть объяснена тем, что увеличение V_c приводит к повышению температуры резания, что способствует разупрочнению материала и, как следствие, снижению Ra .

Круглость является важным показателем качества отверстия, определяющим степень отклонения формы отверстия от идеальной окружности. Круглость характеризует общую форму круга и гарантирует отсутствие чрезмерной овальности или угловатости [2].

На рис. 9, а показано, что минимальное значение круглости (Cr) получено при подаче $f = 0,1$ мм/об и объемной доле V_f SiC = 10 %, а максимальное значение – при объемной доле V_f SiC = 30 % и подаче $f = 0,2$ мм/об. Анализ рис. 9, б позволяет сделать вывод о том, что ми-

нимальное значение Cr соответствует объемной доле V_f SiC = 10 %, а максимальное – V_f SiC = 30 %. Кроме того, наблюдается возрастание Cr при увеличении расхода СОЖ Q : минимальное значение Cr зафиксировано при расходе СОЖ $Q = 90$ мл/ч, а максимальное – при расходе СОЖ $Q = 150$ мл/ч. Рис. 9, а показывает, что минимальное значение Cr достигается при подаче $f = 0,1$ мм/об, а максимальное – при подаче $f = 0,2$ мм/об. Возрастание Cr с увеличением подачи f может быть связано с ростом сил резания. Более быстрое внедрение сверлильного инструмента в заготовку при высокой подаче f увеличивает деформации отверстия и вибрации в режущем инструменте, что приводит к увеличению погрешностей круглости. Сопоставление данных, представленных на рис. 9, а и б, показывает, что Cr быстро растет при увеличении V_f SiC с 10 до 30 %. Минимальное значение Cr наблюдается при V_f SiC = 10 %, а максимальное – при V_f SiC = 30 %.

Заусенец – это пластически деформированный материал, образующийся на кромке компонента в процессе сверления. Заусенцы образуются и распространяются в окружном направлении при подаче сверла в заготовку. Размер выходного заусенца является показателем производительности процесса сверления, который определяет

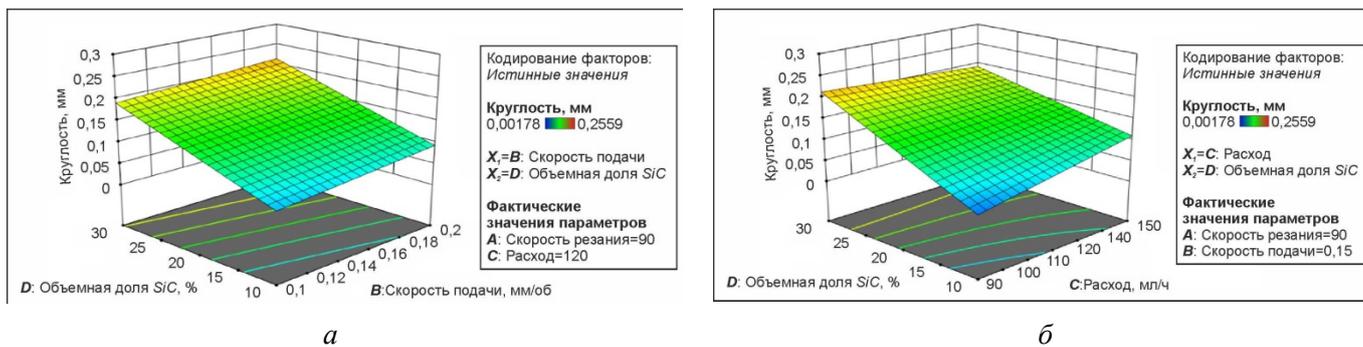


Рис. 9. Влияние скорости резания, подачи, объемной доли SiC и расхода смазочно-охлаждающей жидкости на круглость отверстия при использовании минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости (NMQL)

Fig. 9. Effect of cutting speed, feed rate, SiC volume fraction and flow rate on circularity under NMQL condition

качество готовой продукции. Поэтому важно свести к минимуму образование заусенцев на стадии производства, выбрав правильные параметры процесса сверления.

На рис. 10, а показано, что при увеличении объемной доли V_f SiC с 10 до 20 % высота заусенца Bh также возрастает, однако после 20 % наблюдается уменьшение высоты заусенца Bh ; с увеличением расхода СОЖ Q значение Bh также растет. Максимальное значение высоты заусенца Bh получено при объемной доле V_f SiC 20 % и расходе СОЖ Q 150 мл/ч, а минимальное – при объемной доле V_f SiC = 10 % и расходе СОЖ Q = 90 мл/ч. Из рис. 10, б видно, что скорость резания V_c и подача f не оказывают существенного влияния на высоту заусенца, однако максимальная высота заусенца Bh наблюдается при низких значениях подачи f и скорости резания V_c , т. е. при 60 м/мин и 0,1 мм/об. На рис. 10, а показано, что с увеличением расхода СОЖ Q с 90 до 150 мл/ч высота заусенца Bh увеличивается из-

за избыточного количества жидкости и наночастиц в системе «инструмент – заготовка».

Анализ рис. 10, а показывает, что с увеличением объемной доли V_f SiC с 10 до 20 % наблюдается рост высоты заусенцев Bh . Однако при дальнейшем увеличении объемной доли V_f SiC (свыше 20 %) происходит уменьшение высоты заусенцев Bh . Кроме того, увеличение расхода СОЖ Q также приводит к увеличению Bh . Максимальное значение высоты заусенцев Bh достигается при объемной доле V_f SiC = 20 % и расходе СОЖ Q = 150 мл/ч, в то время как минимальное значение высоты заусенцев Bh наблюдается при объемной доле V_f SiC = 10 % и расходе СОЖ Q = 90 мл/ч. Анализ рис. 10, б демонстрирует отсутствие значительного влияния скорости резания V_x и подачи f на высоту заусенцев Bh . Тем не менее максимальная высота заусенцев Bh зарегистрирована при низких значениях подачи f и скорости резания V_x – 60 м/мин и 0,1 мм/об соответственно.

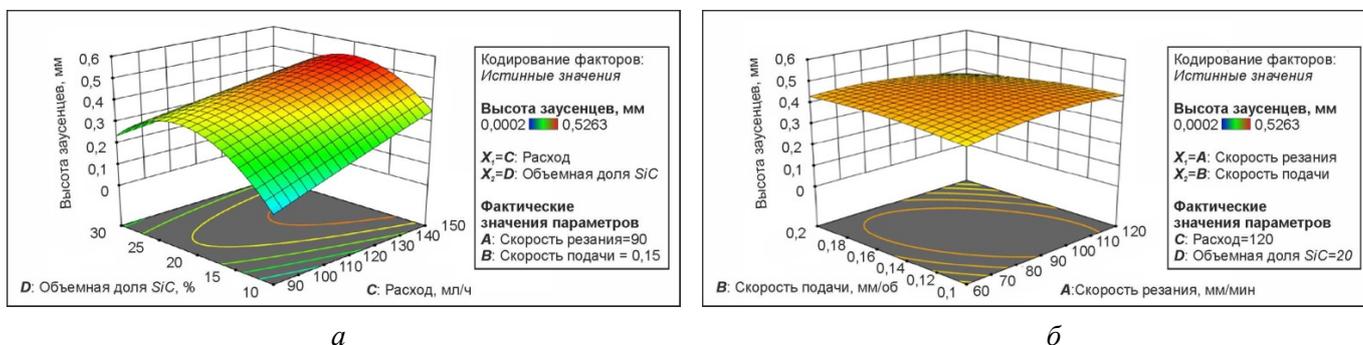


Рис. 10. Влияние скорости резания, подачи, объемной доли SiC и расхода смазочно-охлаждающей жидкости на высоту заусенцев при использовании минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости (NMQL)

Fig. 10. Effect of cutting speed, feed rate, SiC volume fraction and flow rate on burr height under NMQL condition

Согласно рис. 10, а, увеличение расхода СОЖ Q с 90 до 150 мл/ч приводит к росту высоты заусенцев Bh , что обусловлено избыточным количеством жидкости и наночастиц в зоне контакта «инструмент – заготовка» и «инструмент – стружка». Как указано в [21], эффективность воздействия на заготовку ограничивается увеличением силы резания, что вызывает большее разрыхление материала в процессе сверления и, как следствие, увеличение высоты заусенцев Bh . На основании данных, представленных на рис. 10, а, можно также заключить, что высота заусенцев Bh возрастает при увеличении объемной доли V_f SiC от 10 до 20 %. При дальнейшем увеличении объемной доли V_f SiC (от 20 до 30 %) наблюдается снижение высоты заусенцев Bh . Рис. 10, б показывает, что скорость резания V_c не оказывает существенного влияния на высоту заусенцев Bh , однако небольшое увеличение высоты заусенцев Bh отмечается при скорости резания $V_c = 60$ м/мин.

С целью исследования влияния наночастиц оксида графена, смешанных с маслом унди, было проведено сравнение обработки в условиях MQL и NMQL при различных скоростях резания V_c и различных объемных долях V_f SiC. Результаты, представленные на рис. 11, свидетельствуют о том, что при объемной доле V_f SiC 10 % обработка в режиме MQL обеспечивает лучшие результаты по сравнению с обработкой в режиме NMQL. В то же время при объемных долях V_f SiC 20 и 30 % режим NMQL демонстрирует сравнимые или превосходящие результаты, что объясняется исключительной теплопрово-

дностью и высокой смазывающей способностью наночастиц оксида графена. Введение наночастиц оксида графена в масло унди в качестве добавки приводит к значительному увеличению теплопроводности и смазывающей способности, что соответствует снижению сил резания. Кроме того, применение NMQL позволяет существенно снизить осевую силу F_x по сравнению с MQL, что связано с уменьшением силы трения на контактной поверхности за счет эффекта качения наночастиц и с улучшенной эффективностью охлаждения [16]. В целом минимальная осевая сила F_x наблюдается при наименьшей исследованной объемной доле V_f SiC (10 %), в то время как максимальная осевая сила F_x зарегистрирована при наибольшей объемной доле V_f SiC (30 %).

Результаты, представленные на рис. 12, показывают, что при объемной доле V_f SiC = 10 % обработка в режимах MQL и NMQL демонстрирует сопоставимые значения крутящего момента T . С увеличением объемной доли V_f SiC до 20 % наблюдается снижение крутящего момента T при обработке в режиме MQL. Наилучшие результаты в отношении крутящего момента T при объемной доле V_f SiC = 30 % были достигнуты при обработке в режиме NMQL. Предполагается, что снижение крутящего момента T в данном случае обусловлено улучшением смазывающих свойств, связанных с механизмом скольжения частиц оксида графена в смазочно-охлаждающей жидкости [17]. Кроме того, экспериментальные данные указывают на то, что максимальные значения крутящего момента T наблюдаются при промежуточных значениях скорости резания

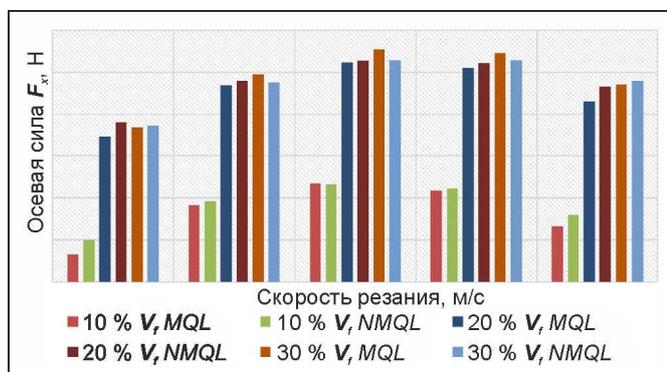


Рис. 11. Сравнение изменения осевой силы (F_x) в зависимости от скорости резания (V_c) и объемной доли SiC при сверлении

Fig. 11. Comparison of variation of thrust force (F_x) with cutting speed (V_c) and SiC volume fraction in drilling

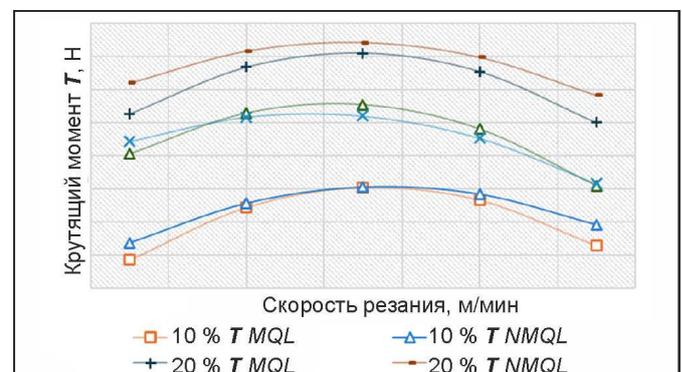


Рис. 12. Сравнение изменения крутящего момента (T) в зависимости от подачи (f) и объемной доли SiC при сверлении

Fig. 12. Comparison of variation of torque (T) with feed rate (f) and SiC volume fraction in drilling

V_x . Снижение крутящего момента T в целом может быть объяснено улучшением характеристик смазки и охлаждения, обеспечиваемым применением наножидкости. Более низкие значения крутящего момента T , зарегистрированные при сверлении с NMQL, вероятно, связаны с увеличенной теплопроводностью и более высоким коэффициентом теплопередачи, которые, как показано в [19], являются ключевыми факторами, обуславливающими превосходство режима NMQL над режимом MQL.

На рис. 13 представлены результаты, демонстрирующие, что применение режима NMQL приводит к снижению высоты заусенцев Bh по сравнению с режимом MQL. Данный эффект объясняется тем, что при использовании режима MQL генерируются более высокие температуры в зоне резания, чем при NMQL. Вследствие этого пластичность обрабатываемого материала увеличивается с ростом температуры, что способствует образованию заусенцев большего размера при обработке в режиме MQL. В целом минимальная высота заусенцев Bh наблюдается при меньшей объемной доле $V_f \text{ SiC} = 10\%$, в то время как максимальная высота заусенцев Bh зарегистрирована при большей объемной доле $V_f \text{ SiC} = 20\%$.

В процессе сверления накопление тепла, как правило, происходит на завершающем этапе обработки вследствие образования нароста на режущей кромке (Built-Up Edge, BUE) по мере того, как режущий инструмент углубляется в заготовку. Это явление оказывает негативное влияние на качество поверхности на выходе из от-

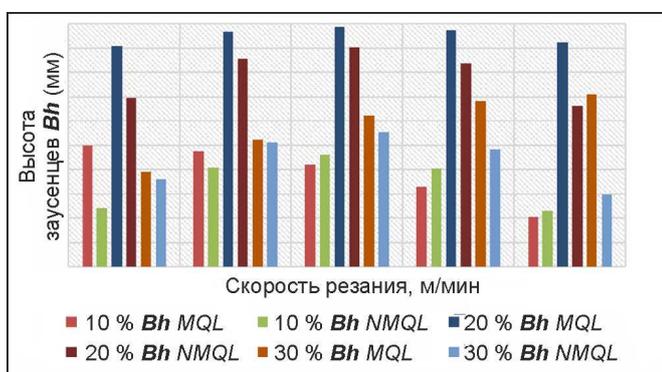


Рис. 13. Сравнение изменения высоты заусенцев (Bh) в зависимости от подачи (f) и объемной доли SiC при сверлении

Fig. 13. Comparison of variation of burr height (Bh) with feed (f) and SiC volume fraction in drilling

верстия. Однако применение NMQL позволяет минимизировать образование заусенцев на выходной поверхности просверленных отверстий, что обусловлено повышенной теплопередачей смазочно-охлаждающей жидкости в зоне контакта. Кроме того, улучшение условий образования нароста на режущей кромке и повышение износостойкости инструмента также способствуют уменьшению образования заусенцев [16]. Наконец, стоит отметить, что высота заусенцев Bh коррелирует с осевой силой F_x и крутящим моментом T , значения которых значительно снижаются при использовании режима NMQL.

Рис. 14 демонстрирует, что при скорости резания $V_c = 30$ м/мин обработка в режиме MQL (минимальная подача смазочно-охлаждающей жидкости) обеспечивает более высокие результаты по сравнению с обработкой в режиме NMQL (минимальная подача нано-смазочно-охлаждающей жидкости). В противоположность этому при других исследованных скоростях резания V_c использование нано-смазочно-охлаждающей жидкости (NMQL) при концентрациях карбида кремния (SiC) в 10, 20 и 30 % по объему приводит к улучшению показателей процесса. Снижение температуры при обработке в режиме NMQL по сравнению с обработкой в режиме MQL объясняется повышенной теплопроводностью, обусловленной введением наночастиц оксида графена в смазочно-охлаждающую жидкость. Синергетический эффект смазывающего действия наночастиц и эффективное проникновение СОЖ в зону контакта снижают коэффициент трения

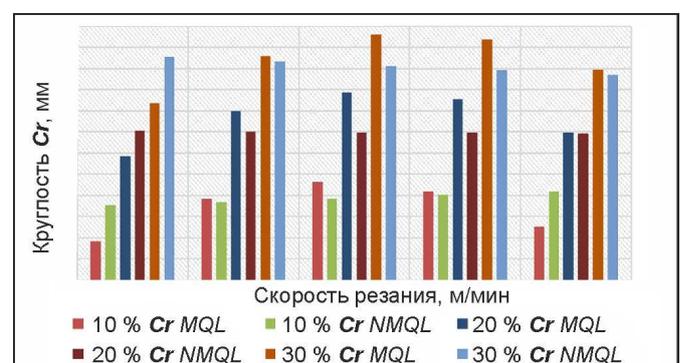


Рис. 14. Сравнение изменения круглости (мм) в зависимости от скорости резания (V_c) и объемной доли SiC при сверлении

Fig. 14. Comparison of variation of circularity (mm) with cutting speed (V_c) and SiC volume fraction in drilling

между стружкой и рабочей поверхностью инструмента, что способствует оптимизации процесса скольжения. Следует отметить, что минимальное значение параметра округлости Cr достигается при наименьшей объемной доле $V_f \text{SiC} = 10\%$, в то время как максимальная сила подачи фиксируется при максимальной объемной доле $V_f \text{SiC} = 30\%$ [20].

Из рис. 15 очевидно, что в области относительно низких скоростей резания V_c обработка в режиме MQL (минимальная подача смазочно-охлаждающей жидкости) обеспечивает более высокие показатели эффективности. В противоположность этому при увеличении скорости резания обработка в режиме NMQL (минимальная подача нано-смазочно-охлаждающей жидкости) демонстрирует превосходящие результаты. При высоких скоростях резания вследствие недостаточного отвода тепловой энергии наблюдается ухудшение качества обработанной поверхности, обусловленное сохранением повышенной температуры в зоне обработки. Использование наножидкостей на основе оксида графена, характеризующихся повышенной теплопроводностью, обеспечивает более эффективный отвод тепла, снижение трения и температуры, что, в свою очередь, способствует улучшению качества формируемой поверхности при высоких скоростях резания. Эффективное снижение температуры в зоне резания достигается за счет высокой теплопроводности наножидкости. Следует отметить, что концепция «эффекта шарикопод-

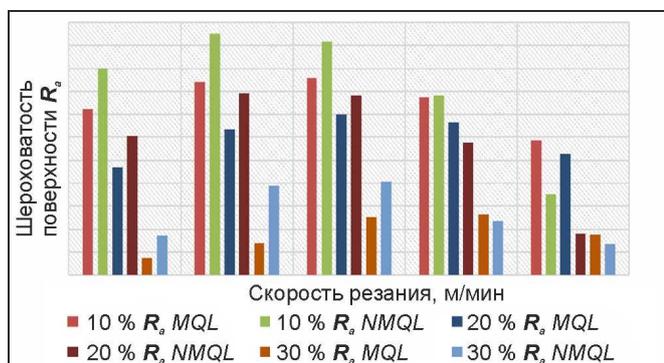


Рис. 15. Сравнение изменения шероховатости поверхности (R_a) в зависимости от скорости резания (V_c) и объемной доли SiC при сверлении

Fig. 15. Comparison of variation of surface roughness (R_a) with cutting speed (V_c) and SiC volume fraction in drilling

шипника», приписываемая используемым при обработке в режиме MQL наночастицам, рассматривается как фактор, способствующий снижению трения и обеспечивающий улучшенное охлаждение и смазку в зоне контакта инструмента и стружки. Это, в свою очередь, приводит к снижению износа инструмента и уменьшению шероховатости обработанной поверхности [4].

Результаты проведенного исследования указывают на преобладание абразивного износа в качестве основного механизма износа инструмента, хотя также было зафиксировано наличие адгезионного износа. Следует отметить, что в процессе механической обработки возможно одновременное проявление различных типов износа, при этом один из механизмов может доминировать в зависимости от условий трения между инструментом и обрабатываемой деталью. На рис. 16, а представлена полученная методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) микрофотография сверла, которое использовалось в условиях охлаждения применением технологии NMQL (минимальная подача нано-смазочно-охлаждающей жидкости). Рис. 16, б демонстрирует увеличенное изображение этого сверла. Проанализировав рис. 16, а и б, можно отметить наличие характерных следов в виде гребней на боковой поверхности инструмента. Вследствие высокой твердости сверл, изготовленных из карбида вольфрама, проявляющийся в виде образования гребней абразивный износ типичен для твердосплавного инструмента. Формирование данных гребней обусловлено возвратно-поступательным движением как фрагментов разрушенного твердосплавного инструмента, так и наночастиц графена в зоне резания. В процессе сверления металлматричных композитов (MMC) наблюдается адгезия фрагментов композиционного материала к инструменту, что приводит к образованию нароста (Built-Up Edge, BUE). Было установлено, что в процессе сверления происходит удаление покрытия с основного материала инструмента в результате комбинированного воздействия абразивного и адгезионного износа. На микрофотографиях SEM отчетливо видны признаки образования нароста, следы абразивного износа, а также выраженное формирование гребней.

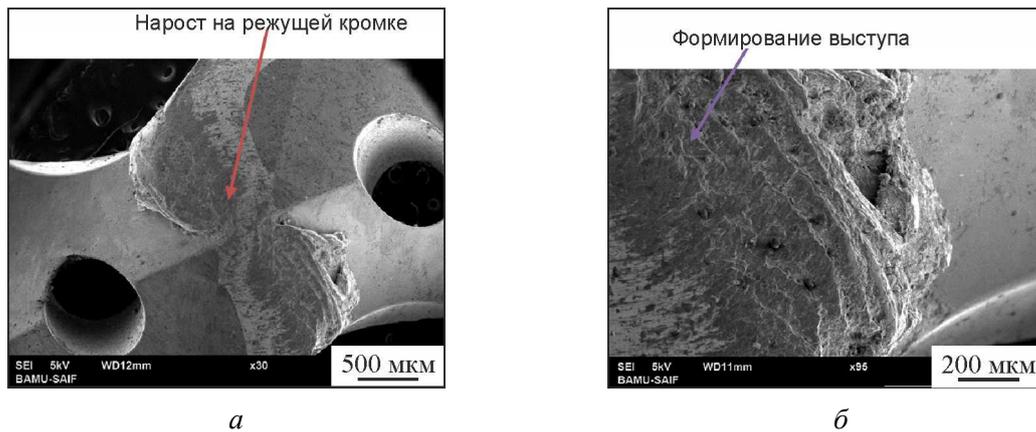


Рис. 16. Микрофотографии сверла, использованного в условиях минимальной подачи смазочно-охлаждающей жидкости (NMQ) после проведения экспериментов

Fig. 16. Micrographs of drill tool used in NMQ condition after experimentation

Заклучение

В рамках проведенного экспериментального исследования была выполнена серия опытов по сверлению металломатричных композиционных материалов (MMC) с использованием инструмента с PVD-покрытием. Целью работы являлось изучение влияния смазочно-охлаждающей жидкости с добавлением наночастиц оксида графена на такие характеристики процесса, как осевая сила F_x , крутящий момент T , шероховатость обработанной поверхности Ra , высота заусенцев Bh и отклонение от округлости Cr . На основании полученных результатов были сформулированы следующие заключения.

1. Проведенное исследование подтверждает возможность эффективного применения экологически ориентированных технологий, в частности механической обработки в режиме NMQ (минимальной подачи нано-смазочно-охлаждающей жидкости), без значительного ухудшения технологических показателей при выполнении промышленных операций, таких как сверление металломатричных композиционных материалов твердосплавным сверлом с PVD-покрытием.

2. В качестве перспективной альтернативы традиционным смазочно-охлаждающим жидкостям при сверлении металломатричных композиционных материалов предложено использование наночастиц оксида графена, диспергированных в непищевом растительном масле унди.

3. Установлено, что применение режима NMQ обеспечивает более высокое качество формируемых отверстий по сравнению с об-

работкой в режиме MQL (минимальной подачи смазочно-охлаждающей жидкости). Данный эффект обусловлен комбинированным смазывающим действием наночастиц и масла унди, обеспечивающим эффективное проникновение в зону контакта инструмента и обрабатываемого материала, а также снижение трения между стружкой и рабочей поверхностью инструмента, что в свою очередь способствует улучшению скольжения и повышению точности геометрической формы отверстий (округлости). Максимальные значения отклонения от округлости наблюдались при высокой скорости резания, минимальные – при начальной скорости. Аналогичная тенденция отмечена при увеличении объемной доли карбида кремния (SiC) в составе металломатричного композиционного материала с 10 до 30 %: увеличение содержания SiC сопровождается ростом отклонения от округлости.

4. В рамках данной работы разработаны математические модели, описывающие взаимосвязь между параметрами процесса и выходными характеристиками (откликами) на основе методологии поверхности отклика (RSM). Показано, что для описания указанных зависимостей наиболее адекватной является модель линейной регрессии.

5. Выявлено, что высота заусенцев резко увеличивается при изменении объемной доли SiC в составе металломатричного композиционного материала с 10 до 20 %. При дальнейшем увеличении содержания SiC до 30 % наблюдается незначительное снижение высоты заусенцев.

6. Показано, что использование наножидкостей на основе оксида графена, обладающих повышенной теплопроводностью, обеспечивает более интенсивный отвод теплоты из зоны резания и, как следствие, повышение качества обработанной поверхности при высоких скоростях резания по сравнению с обработкой в режиме MQL.

7. Установлено, что использование режима обработки NMQL позволяет снизить высоту заусенцев по сравнению с условиями охлаждения, реализуемыми при использовании режима MQL. Это связано с тем, что обработка в режиме MQL характеризуется более высокими температурами в зоне резания, что приводит к увеличению пластичности обрабатываемого материала и, как следствие, к формированию заусенцев большей высоты.

8. Установлено, что при относительно низких скоростях резания обработка в режиме MQL обеспечивает более высокое качество обработанной поверхности, в то время как при увеличении скорости резания лучшие результаты достигаются при обработке в режиме NMQL. Данный эффект обусловлен повышенной теплопроводностью наноСОЖ, обеспечивающей более эффективный отвод тепла из зоны резания, а также снижение трения и температуры, что в конечном счете положительно сказывается на качестве обработанной поверхности при высоких скоростях резания.

9. Зафиксированы более низкие значения крутящего момента T при использовании режима NMQL по сравнению с режимом MQL. Снижение крутящего момента T может быть связано с улучшением смазывающих свойств смазочно-охлаждающей жидкости за счет скользящего действия частиц оксида графена. Максимальные значения крутящего момента T наблюдались при средних значениях скорости резания.

10. Осевая сила достигает максимальных значений при высоких скоростях резания и минимальных значений при начальных скоростях. Аналогичная тенденция наблюдается при изменении объемной доли SiC: минимальные значения осевой силы соответствуют минимальной объемной доле SiC.

11. Методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) выявлены следы адгезионного и абразивного износа, а также отчетливые признаки формирования гребней на поверхности режущего инструмента.

12. Применение режима NMQL обеспечивает сопоставимые или более низкие значения осевой силы по сравнению с режимом MQL. Снижение осевой силы связано с тем, что наночастицы оксида графена, диспергированные в масле унди, приводят к увеличению теплопроводности и улучшению смазывающих свойств, что, в свою очередь, способствует снижению силы резания.

13. Полученные результаты подтверждают, что использование наноСОЖ при обработке в режиме MQL позволяет повысить эффективность MQL, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов. Введение наночастиц в состав MQL способствует минимизации трения на контактной поверхности инструмента и стружки, что в конечном итоге приводит к снижению температуры в зоне резания.

14. Предложенные технологические решения могут быть использованы в автомобильной и авиакосмической промышленности при обработке легких и труднообрабатываемых материалов, таких как алюмоматричные композиционные материалы.

Список литературы

1. A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications / M. Aamir, K. Giasin, M. Tolouei-Rad, A. Vafadar // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9. – P. 12484–12500. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.09.003.
2. Ali S.H.R. Roles and motivations for roundness instrumentation metrology // *Journal of Control Engineering and Instrumentation*. – 2015. – Vol. 1 (1). – P. 11–28.
3. Amrita M., Srikant R.R., Sitaramaraju A. Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2014. – Vol. 29. – P. 600–605. – DOI: 10.1080/10426914.2014.893060.
4. Atabani A.E., César A.D.S. Calophyllum inophyllum L. – A prospective non-edible biodiesel feedstock. Study of biodiesel production, properties, fatty acid composition, blending and engine performance // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 37. – P. 644–655. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.037.
5. Superior thermal conductivity of single-layer grapheme / A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, C.N. Lau // *Nano Letters*. – 2008. – Vol. 8. – P. 902–907. – DOI: 10.1021/nl0731872.
6. Chatha S.S., Pa A., Singh T. Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication // *Journal of*



Cleaner Production. – 2016. – Vol. 137. – P. 537–545. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.139.

7. The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel / N.R. Dhar, M.W. Islam, S. Islam, M.A.H. Mithu // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 171. – P. 93–99. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.047.

8. *Duc T.M., Long T.T., Van Thanh D.* Evaluation of minimum quantity lubrication and minimum quantity cooling lubrication performance in hard drilling of Hardox 500 steel using Al₂O₃ nanofluid // Advances in Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 12. – DOI: 10.1177/1687814019888404.

9. *Fox N.J., Stachowiak G.W.* Vegetable oil-based lubricants – a review of oxidation // Tribology International. – 2007. – Vol. 40. – P. 1035–1046. – DOI: 10.1016/j.triboint.2006.10.001.

10. *Fratila D.* Environmentally friendly manufacturing processes in the context of transition to sustainable production // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – Vol. 8. – P. 163–175. – DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00815-3.

11. *Gaitonde V.N., Karnik S.R., Davim J.P.* Minimising burr size in drilling: integrating response surface methodology with particle swarm optimization // Mechatronics and Manufacturing Engineering. – Woodhead Publishing, 2012. – P. 259–292. – DOI: 10.1533/9780857095893.259.

12. *Gaitonde V.N., Karnik S.R., Davim J.P.* Some studies in metal matrix composites machining using response surface methodology // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2009. – Vol. 28. – P. 2445–2457. – DOI: 10.1177/0731684408092375.

13. Finite element simulation and analysis of serrated chip formation during high-speed machining of AA7075–T651 alloy / W. Jomaa, O. Mechri, J. Lévesque, V. Songmene, P. Bocher, A. Gakwaya // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 26. – P. 446–458. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.015.

14. *Kathirve M., Palanikumar K.* Effect of volume fraction on surface roughness in turning of hybrid metal matrix (A6061 Al+SiC+Graphite) composites // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 766–767. – P. 263–268. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.766-767.263.

15. *Katna R., Suhai 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.

16. *Khanna N., Shah P., Chetan.* Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO₂ techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy //

Tribology International. – 2020. – Vol. 146. – P. 106196. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106196.

17. *Kishawy H.A., Hosseini A.* Environmentally conscious machining // Machining Difficult-to-Cut Materials. – Springer, 2019. – P. 205–238. – DOI: 10.1007/978-3-319-95966-5_7.

18. Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel / W.L. Ku, C.L. Hung, S.M. Lee, H.M. Chow // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 53. – P. 935–944. – DOI: 10.1007/s00170-010-2899-5.

19. Thermal expansion of isotropic Duralcan metal–matrix composites / S. Lemieux, S. Elomari, J.A. Nemes, M.D. Skibo // Journal of Materials Science. – 1998. – Vol. 33. – P. 4381–4387. – DOI: 10.1023/A:1004437032224.

20. *Vijayaraghavan L.* Machining of composites an overview // International Journal on Design and Manufacturing Technologies. – 2007. – Vol. 1 (1). – P. 16–23. – DOI: 10.18000/ijodam.70004.

21. *Manna A., Bhattacharayya B.* A study on machinability of Al/SiC-MMC // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140 (1–3). – P. 711–716. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00905-1.

22. *Sodavadia K.P., Makwana A.H.* Experimental investigation on the performance of coconut oil based nano fluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel // International Journal of Advanced Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 4 (1). – P. 55–60.

23. *Muthuvel S., Naresh Babu M., Muthukrishnan N.* Copper nanofluids under minimum quantity lubrication during drilling of AISI 4140 steel // Australian Journal of Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 18 (suppl. 1). – P. S151–S164. – DOI: 10.1080/14484846.2018.1486694.

24. *Patil N.G., Brahmankar P.K.* Determination of material removal rate in wire electro-discharge machining of metal matrix composites using dimensional analysis // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 51. – P. 599–610. – DOI: 10.1007/s00170-010-2633-3.

25. *Ralph B., Yuen H.C., Lee W.B.* The processing of metal matrix composites – an overview // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 63 (1–3). – P. 339–353. – DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02645-3.

26. Aluminium metal matrix composites – a review / B.V. Ramnath, C. Elanchezian, R.M. Annamalai, S. Aravind, T. Sri, A. Atreya, V. Vignes, C. Subramanian // Reviews on Advanced Materials Science. – 2014. – Vol. 38. – P. 55–60.

27. Analysis of cutting temperature during turning of SS 304 using uncoated and PVD coated carbide inserts / A. Kulkarni, N. Ambhore, A. Deshpande, P. Anerao,

S. Chinchani // *Materials Today: Proceedings.* – 2022. – Vol. 68 (6). – P. 2569–2573. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.417.

28. Влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом FDM: исследование для имплантата тазобедренного сустава / Й.Б. Дама, Б.Ф. Джоги, Р. Паваде, А.П. Кулкарни // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 19–40. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40.

29. Pawade R.S., Joshi S.S. Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey

relational analysis (TGRA) // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2011. – Vol. 56 (1–4). – P. 57–62. – DOI: 10.1007/s00170-011-3183-z.

30. Чинчаникар С. Моделирование характеристик износа при скольжении композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), армированного углеродным волокном, в паре трения с SS304 (12X18H10T) // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 40–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

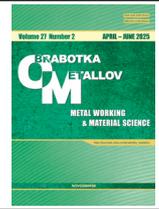
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Experimental investigation of graphene oxide-based nano cutting fluid in drilling of aluminum matrix composite reinforced with SiC particles under nano-MQL conditions

Nilesh Patil^{1,a}, Sachin Agarwal^{2,b}, Atul Kulkarni^{3,c,*}, Atul Saraf^{4,d},
 Milind Rane^{3,e}, Yogiraj Dama^{5,f}

¹ Maharashtra Institute of Technology, Aurangabad-431010, Maharashtra, India

² Deogiri Institute of engineering and management studies, Aurangabad, 431005, India

³ Vishwakarma Institute of Technology, Pune, Maharashtra, 411037, India

⁴ Sardar Vallabhai National Institute of Technology, Surat, 395007, India

⁵ Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Lonere, Raigad, Maharashtra, 402103, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4884-4267>,  nileshgpatil@rediffmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4582-1745>,  sachinagarwal@dietms.org;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>,  atul.kulkarni@vit.edu; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-4776-6874>,  atul.saraf001@gmail.com;

^e  <https://orcid.org/0000-0001-5829-5305>,  milind.rane@vit.edu; ^f  <https://orcid.org/0009-0008-5404-4347>,  yogirajdama@dbatu.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 January 2025

Revised: 12 February 2025

Accepted: 17 March 2025

Available online: 15 June 2025

Keywords:

Nano cutting fluid

MMQL

Graphene oxide

Circularity

Burr height

Empirical modeling

ABSTRACT

Introduction. Minimum Quantity Lubrication (*MQL*) is effectively employed as suitable cooling strategy. However, compared to flood cooling, which is widely used in the industry, *MQL* is characterized by a lower heat dissipation capacity. While thermal shock is reported in flood cooling, the use of *MQL* ensures a smoother chip removal and reduces the risk of thermal stress. **Research methods.** Within the scope of this study, experimental investigations were carried out on drilling of aluminum matrix composite (*MMC*) reinforced with silicon carbide (*Al-SiC MMC*) using *AlCrN PVD*-coated drills (drill diameter 8 mm). *MMC* samples were manufactured with varying volume fractions of *SiC* (10–30%). The aim of the experiments was to study the influence of non-edible vegetable oil with the addition of graphene oxide (used as a cutting fluid) on the drilling process of *AlSiC MMC*. The cutting speed (30–150 m/min), feed rate (0.05–0.25 mm/rev), volume fraction of *SiC* (10–30%), and *MQL* flow rate (60–180 ml/h) were selected as input process parameters. Their response parameters were cutting force, torque, surface roughness, hole circularity, and burr height during high-speed drilling of *MMC*. The undi (*Calophyllum inophyllum*) oil parameters were determined in accordance with the *ASTM 6751* standard. The surface morphology and elemental analysis of graphene oxide were investigated using scanning electron microscopy (*SEM*) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (*EDAX*). **The purpose of the work.** The use of nano-cutting fluid in combination with *MQL* is one of the promising approaches for further improving the characteristics of *MQL*, especially when drilling difficult-to-machine materials. The introduction of nanomaterials into *MQL* contributes to reducing friction at the tool-chip interface, which leads to a decrease in cutting temperature. These methods facilitate the machining of lightweight and difficult-to-machine materials, in particular, aluminum-based metal matrix composites (*MMCs*), which are widely used in the automotive and aerospace industries. **Results and Discussion.** It was found that the use of graphene oxide nanoparticles dispersed in non-edible undi (*Calophyllum inophyllum*) oil represents a promising alternative to traditional cutting fluids in drilling *MMC*. The aim of the study was to develop semi-empirical models for predicting surface roughness and temperature for various compositions of *MMC*. Increased cutting efficiency is achieved by precisely determining the temperature in the machining zone. However, the practical determination of the cutting temperature in each specific case involves significant labor and financial costs. It was additionally found that graphene oxide nanoparticles mixed with non-edible undi (*Calophyllum inophyllum*) oil represent an effective alternative to traditional cutting fluids in drilling *MMCs*. The present work develops a comprehensive empirical formula for predicting the theoretical temperature and surface roughness. It was found that the majority of the power input into the machining process is transformed into thermal energy.

For citation: Patil N., Agarwal S., Kulkarni A.P., Saraf A., Rane M., Dama Y.B. Experimental investigation of graphene oxide-based nano cutting fluid in drilling of aluminum matrix composite reinforced with SiC particles under nano-MQL conditions. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 103–125. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-103-125. (In Russian).

* Corresponding author

Kulkarni Atul P., Professor

Vishwakarma Institute of Technology,

Pune, Maharashtra, 411037, India

Tel.: 91-2026950419, e-mail: atul.kulkarni@vit.edu

References

1. Aamir M., Giasin K., Tolouei-Rad M., Vafadar A. A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, pp. 12484–12500. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.09.003.
2. Ali S.H.R. Roles and motivations for roundness instrumentation metrology. *Journal of Control Engineering and Instrumentation*, 2015, vol. 1 (1), pp. 11–28.
3. Amrita M., Srikant R.R., Sitaramaraju A. Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, vol. 29, pp. 600–605. DOI: 10.1080/10426914.2014.893060.
4. Atabani A.E., César A.D.S. Calophyllum inophyllum L. – A prospective non-edible biodiesel feedstock. Study of biodiesel production, properties, fatty acid composition, blending and engine performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 37, pp. 644–655. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.037.
5. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 2008, vol. 8, pp. 902–907. DOI: 10.1021/nl0731872.
6. Chatha S.S., Pa A., Singh T. Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 137, pp. 537–545. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.139.
7. Dhar N.R., Islam M.W., Islam S., Mithu M.A.H. The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 171, pp. 93–99. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.047.
8. Duc T.M., Long T.T., Van Thanh D. Evaluation of minimum quantity lubrication and minimum quantity cooling lubrication performance in hard drilling of Hardox 500 steel using Al₂O₃ nanofluid. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 12. DOI: 10.1177/1687814019888404.
9. Fox N.J., Stachowiak G.W. Vegetable oil-based lubricants – a review of oxidation. *Tribology International*, 2007, vol. 40, pp. 1035–1046. DOI: 10.1016/j.triboint.2006.10.001.
10. Fratila D. Environmentally friendly manufacturing processes in the context of transition to sustainable production. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, vol. 8, pp. 163–175. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00815-3.
11. Gaitonde V.N., Karnik S.R., Davim J.P. Minimising burr size in drilling: integrating response surface methodology with particle swarm optimization. *Mechatronics and Manufacturing Engineering*. Woodhead Publishing, 2012, pp. 259–292. DOI: 10.1533/9780857095893.259.
12. Gaitonde V.N., Karnik S.R., Davim J.P. Some studies in metal matrix composites machining using response surface methodology. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, vol. 28, pp. 2445–2457. DOI: 10.1177/0731684408092375.
13. Jomaa W., Mechri O., Lévesque J., Songmene V., Bocher P., Gakwaya A. Finite element simulation and analysis of serrated chip formation during high-speed machining of AA7075–T651 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 26, pp. 446–458. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.015.
14. Kathirve M., Palanikumar K. Effect of volume fraction on surface roughness in turning of hybrid metal matrix (A6061 Al+SiC+Graphite) composites. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 766–767, pp. 263–268. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.766-767.263.
15. Katna R., Suhai 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.
16. Khanna N., Shah P., Chetan. Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO₂ techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy. *Tribology International*, 2020, vol. 146, p. 106196. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106196.
17. Kishawy H.A., Hosseini A. Environmentally conscious machining. *Machining Difficult-to-Cut Materials*. Springer, 2019, pp. 205–238. DOI: 10.1007/978-3-319-95966-5_7.
18. Ku W.L., Hun C.L., Lee S.M., Chow H.M. Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 53, pp. 935–944. DOI: 10.1007/s00170-010-2899-5.
19. Lemieux S., Elomari S., Nemes J.A., Skibo M.D. Thermal expansion of isotropic Duralcan meta–matrix composites. *Journal of Materials Science*, 1998, vol. 33, pp. 4381–4387. DOI: 10.1023/A:1004437032224.

20. Vijayaraghavan L. Machining of composites an overview. *International Journal on Design and Manufacturing Technologies*, 2007, vol. 1 (1), pp. 16–23. DOI: 10.18000/ijodam.70004.
21. Manna A., Bhattacharayya B. A study on machinability of Al/SiC-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 140 (1–3), pp. 711–716. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00905-1.
22. Sodavadia K.P., Makwana A.H. Experimental investigation on the performance of coconut oil based nano fluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 2014, vol. 4 (1), pp. 55–60.
23. Muthuvel S., Naresh Babu M., Muthukrishnan N. Copper nanofluids under minimum quantity lubrication during drilling of AISI 4140 steel. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 18 (suppl. 1), pp. S151–S164. DOI: 10.1080/14484846.2018.1486694.
24. Patil N.G., Brahmkankar P.K. Determination of material removal rate in wire electro-discharge machining of metal matrix composites using dimensional analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 51, pp. 599–610. DOI: 10.1007/s00170-010-2633-3.
25. Ralph B., Yuen H.C., Lee W.B. The processing of metal matrix composites – an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 63 (1–3), pp. 339–353. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02645-3.
26. Ramnath B.V., Elanchezian C., Annamalai R.M., Aravind S., Sri T., Atreya A., Vignes V., Subramanian C. Aluminium metal matrix composites – a review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2014, vol. 38, pp. 55–60.
27. Kulkarni A., Ambhore N., Deshpande A., Anerao P., Chinchankar S. Analysis of cutting temperature during turning of SS 304 using uncoated and PVD coated carbide inserts. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 68 (6), pp. 2569–2573. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.417.
28. Dama Y., Jogi B., Pawade R., Kulkarni A. Vliyanie napravleniya pechati na kharakter iznosa PLA-biomateriala, poluchennogo metodom FDM: issledovanie dlya implantata tazobedrennogo sustava [Impact of print orientation on wear behavior in FDM printed PLA Biomaterial: study for hip-joint implant]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 19–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40.
29. Pawade R.S., Joshi S.S. Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 56 (1–4), pp. 57–62. DOI: 10.1007/s00170-011-3183-z.
30. Chinchankar S. Modelirovanie kharakteristik iznosa pri skol'zhenii kompozitsionnogo materiala na osnove politetraftoretilena (PTFE), armirovannogo uglerodnym voloknom, v pare treniya s SS304 (12Kh18N10T) [Modeling of sliding wear characteristics of Polytetrafluoroethylene (PTFE) composite reinforced with carbon fiber against SS304]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 40–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

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>).