

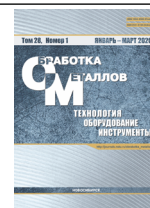
НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Точение сплава Inconel 718 ротационным инструментом с собственным приводом при использовании гибридной наножидкости в условиях охлаждения минимальным количеством смазочно-охлаждающей жидкости (MQL)

Сатиш Чинчаникар^{1, а, *}, Нитин Мотги^{2, 3, в}

¹ Кафедра машиностроения, Технологический институт Вишвакарма, филиал Университета Савитрибай Пхуле Пуны, Пуна – 411037, Махараштра, Индия

² Кафедра машиностроения, Институт информационных технологий Вишвакарма, филиал Университета Савитрибай Пхуле Пуны, Пуна – 411048, Махараштра, Индия

³ Кафедра машиностроения, Международный университет имени Д.И. Патилы, Акурди, Пуна, Махараштра, 411044, Индия

^а <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchaniakar@vit.edu; ^б <https://orcid.org/0000-0001-9062-8341>, nitin.221p0031@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.941.1:621.9.025:621.892.2:669.245:620.3

История статьи:

Поступила: 05 ноября 2025

Рецензирование: 22 ноября 2025

Принята к печати: 17 декабря 2025

Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Точение

Inconel 718

MQL

Вращающийся инструмент

Наножидкость

АННОТАЦИЯ

Введение. Жаропрочные сплавы, в частности никелевые, имеют критическое значение в авиа- и ракетостроении, а также в аэрокосмической отрасли в целом благодаря сочетанию высокой износостойкости и прочности. Однако существенный нагрев в зоне резания при их механической обработке создает значительные технологические сложности. Производители постоянно ведут поиск новых подходов к повышению обрабатываемости таких материалов, применяя передовые технологии механической обработки, современный режущий инструмент и эффективные методы охлаждения. В этом контексте вращающиеся инструменты демонстрируют существенный потенциал для повышения производительности при обработке труднообрабатываемых материалов. **Цель работы.** Корректное определение геометрических характеристик и допусков (GD&T) при обработке аэрокосмических сплавов, что является ключевым для обеспечения точности и взаимозаменяемости деталей. Тем не менее влияние наножидкостей на эти параметры в процессе точения вращающимися инструментами изучено недостаточно. **Методы исследования.** В работе исследовался процесс точения сплава Inconel 718 с применением гибридной наножидкости в режиме охлаждения минимальным количеством СОЖ (NFMQL) и использовался ротационный инструмент с собственным приводом (SPRT). Наножидкость была получена диспергированием наночастиц Al₂O₃ и многослойных углеродных нанотрубок в пальмовом масле. Износ инструмента оценивался по данным оптической и сканирующей электронной микроскопии. Проанализирована зависимость радиальных параметров GD&T (отклонение от круглости, цилиндричности, радиальное биение), шероховатости поверхности, стойкости инструмента и твердости заготовки от режимов резания. Для определения оптимальных компромиссных параметров обработки и построения фронта Парето использовалась комбинация метода TOPSIS (техника упорядочения предпочтений по сходству с идеальным решением) и генетического алгоритма (GA). В завершение представлены обобщенные результаты оптимизации. **Результаты и обсуждение.** Для оценки обрабатываемости сплава Inconel 718 при точении инструментом SPRT в условиях гибридной наножидкости. Исследованы отклонения от круглости и цилиндричности, радиальное биение, а также характеристики обработанной поверхности. Анализ износа инструмента выполнялся методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что шероховатость поверхности и стойкость инструмента в наибольшей степени зависят от подачи и скорости резания, в то время как отклонение от цилиндричности наиболее чувствительно к глубине резания. С помощью комбинации генетического алгоритма и метода TOPSIS были получены фронт Парето и набор наилучших компромиссных решений. Показано, что точение сплава Inconel 718 при подаче 0,1 мм/об, глубине резания 0,2 мм и скорости резания 30...60 м/мин позволяет достичь отклонений от круглости и цилиндричности до 5,68 мкм, радиального биения – до 0,43 мм, а также следующих диапазонов значений: шероховатость поверхности 1,07...1,54 мкм, стойкость инструмента 3,46...8,44 мин, твердость заготовки 36...38 HRC. Результаты работы представляют ценность для проектирования самовращающихся инструментов и способствуют их широкому внедрению в практику обработки жаропрочных сплавов. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются изучение агрегации наночастиц в наножидкостях и применение модифицирующих присадок для повышения эффективности обработки. Кроме того, потенциал повышения производительности в условиях NFMQL может быть реализован за счет использования микротекстурированных самоустанавливающихся вращающихся инструментов в комбинации с наножидкостями, что также позволит улучшить показатели целостности поверхностного слоя.

Для цитирования: Чинчаникар С., Мотги Н. Точение сплава Inconel 718 ротационным инструментом с собственным приводом при использовании гибридной наножидкости в условиях охлаждения минимальным количеством смазочно-охлаждающей жидкости (MQL) // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 152–175. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-152-175.

*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, д.т.н., профессор

Кафедра машиностроения,

Институт информационных технологий Вишвакарма,

филиал Университета Савитрибай Пхуле Пуны,

Пуна – 411048, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950401, e-mail: satish.chinchaniakar@viit.ac.in

Введение

Жаропрочные сплавы на основе титана и никеля являются критически важными материалами в авиа- и ракетостроении благодаря сочетанию износостойкости, высокой прочности

и долговечности. Однако интенсивное тепло-выделение при механической обработке данных сплавов существенно ухудшает их обрабатываемость [1, 2]. В связи с этим активно разрабатываются методы повышения обрабатываемости, основанные на применении совершенного режущего инструмента и эффективных систем охлаждения [3].

Одним из ответов на ужесточающиеся экологические нормы и требования охраны труда стало внедрение технологии смазочно-охлаждающей обработки с минимальным количеством смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) (minimum quantity lubrication, MQL), призванной снизить температурную нагрузку. Для компенсации относительно низкой теплопроводности базовых масел в них вводят наночастицы, что позволяет значительно улучшить теплоотвод благодаря высокой теплопроводности дисперсной фазы [4]. Исследования таких наножидкостей (нанодисперсных систем) активно развиваются ввиду их уникальных эксплуатационных свойств, способствующих повышению технологической и экологической эффективности. Ключевыми параметрами, определяющими их влияние на обрабатываемость, остаются природа базовой жидкости и концентрация наночастиц [5].

Ряд исследований был посвящен оценке обрабатываемости никелевых сплавов с использованием как унитарных, так и гибридных наножидкостей (смесей, содержащих различные наночастицы – графен, углеродные нанотрубки, оксиды меди – в таких базовых жидкостях, как метанол, вода, а также минеральные, растительные и синтетические масла) [6]. Наибольшую эффективность при токарной обработке никелевых сплавов продемонстрировали наножидкости на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и оксида алюминия (Al_2O_3), что объясняется их повышенной охлаждающей способностью и пониженной смачиваемостью [7, 8]. В работе [9] Махесана и Пател (Makhesana и Patel) применяли для обработки сплава Inconel 718 в условиях MQL наножидкость на основе пальмового масла с диспергированными наночастицами дисульфида молибдена (MoS_2). Было установлено, что по сравнению с другими режимами использование 1%-й концентрации MoS_2 обеспечивает снижение износа инструмента и шероховатости обработанной поверхности.

Вращающиеся инструменты обладают значительным потенциалом для увеличения стойкости инструмента и улучшения качества поверхности при обработке труднообрабатываемых материалов. Показано, что режущая пластина в ротационном инструменте с собственным приводом (self-propelled rotary tool, SPRT), который вращается вокруг своей оси, обеспечивает равномерное распределение износа и тепловой нагрузки по режущей кромке, что приводит к росту стойкости [10]. Благодаря улучшенному охлаждению и непрерывному контакту заготовки со свежими участками режущей кромки ротационный инструмент с собственным приводом демонстрирует превосходные эксплуатационные характеристики в сравнении с традиционными статическими инструментами, что подтверждено рядом сравнительных исследований [11, 12]. Кроме того, установлено, что сама схема обработки ротационным инструментом существенно повышает стойкость инструмента за счет равномерного распределения износа, снижения эффективной скорости резания и интенсификации теплоотвода [13].

Исследователи оптимизировали параметры обработки, определяя оптимальную геометрию и размеры ротационного инструмента с собственным приводом, включая диаметр режущих пластин, углы наклона, передний и задний углы. Установлено, что ключевым фактором для совпадения направления силы резания с осью максимальной жесткости инструмента является выбор оптимального угла установки пластины, скорости ее вращения и диаметра инструмента [14–16]. Кроме того, при проектировании ротационного инструмента с собственным приводом требуется учитывать жесткость подшипникового узла в державке вращающегося инструмента, что позволяет снизить волнистость поверхности и повысить размерную точность обрабатываемой детали [15–17].

Все чаще для повышения обрабатываемости сплава Inconel 718 применяются современные методы оптимизации, поскольку традиционные подходы не позволяют эффективно учитывать совокупность зачастую противоречивых целевых показателей. Для многоцелевой оптимизации широко используются методы принятия решений при многих критериях (multi-criteria decision-making, MCDM) и эволюционные

алгоритмы. Одним из примеров таких гибридных подходов является интеграция метода TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) с генетическим алгоритмом (GA) [8, 18–21].

В предшествующих работах для оптимизации режимов точения сплава Inconel 718 использовался гибридный подход, сочетающий генетический алгоритм (GA) и метод TOPSIS [8, 18]. Полученные результаты продемонстрировали, что GA генерирует обширное множество допустимых решений, а TOPSIS обеспечивает их эффективное ранжирование по степени оптимальности. В этих исследованиях отмечалась ключевая роль назначения весовых коэффициентов в методе TOPSIS и высокая чувствительность выходных результатов к данному этапу. Рао с соавторами (Rao et al.) [19] на основе методов Тагучи, серого реляционного анализа (grey relational analysis, GRA) и TOPSIS разработали модель многооткликовой оптимизации процесса точения сплава Inconel 718. Проведенное ими сравнение подтвердило эффективность подхода Тагучи-GRA для оптимизации обработки никелевых сплавов. В других работах оптимизация точения сплава Inconel 718 осуществлялась с применением различных методик, включая TOPSIS, DEAR (data envelopment analysis ranking) и GRA. Все эти подходы показали сопоставимую эффективность в определении схожего набора оптимальных параметров [20, 21].

Несмотря на потенциальные преимущества, механической обработке сплава Inconel 718 ротационным инструментом с собственным приводом посвящено крайне мало исследований. Эта ограниченная исследовательская активность может объясняться малой доступностью ротационных инструментов. Сообщается, что наиболее распространенным видом отказа ротационного инструмента с собственным приводом является выкрашивание режущей кромки сменной пластины, вызываемое механическими и тепловыми ударами вследствие непрерывного врезания в заготовку нового участка кромки в течение всего процесса обработки [13]. Согласно имеющимся данным из научной литературы, прирост производительности при обработке сплава Inconel 718 вращающимся инструментом оказывается не столь значительным, как в случае с титановыми сплавами. Это объясняется выраженной

склонностью Inconel 718 к деформационному упрочнению (наклепу), что сокращает стойкость инструмента. Кроме того, исследования показали, что ротационный инструмент с собственным приводом должен обладать достаточной жесткостью, чтобы исключить биение пластины и образование волнистости на обработанной поверхности [12, 15–17].

Глубокое понимание назначения геометрических характеристик и допусков (geometric dimensioning and tolerancing, GD&T), таких как круглость, цилиндричность и радиальное биение, крайне важно при обработке аэрокосмических сплавов для обеспечения точности и взаимозаменяемости деталей в производстве. Автоколебания инструмента (биение), являющиеся распространенным видом отказа при обработке труднообрабатываемых сплавов, существенно влияют на параметры GD&T. Тем не менее лишь в немногих работах исследуются параметры GD&T при точении Inconel 718 [11, 12]. Для обеспечения точного изготовления и корректной сборки деталей необходимы дальнейшие исследования параметров GD&T при обработке Inconel 718 с учетом влияния технологических параметров процесса.

Проведенный анализ литературы показывает, что использование ротационного инструмента с собственным приводом хотя и способствует улучшению обрабатываемости, но может вызывать более глубокое деформационное упрочнение (наклеп) в приповерхностном слое заготовки. Следовательно, **цель настоящей работы** состоит в достижении повышенной стойкости инструмента при роторной обработке без ухудшения целостности поверхности. Кроме того, в литературе представлено лишь ограниченное количество исследований по точению сплава Inconel 718 с применением наножидкостей.

Таким образом, в данном исследовании изучается точение сплава Inconel 718 с применением гибридной наножидкости в условиях MQL при использовании ротационного твердосплавного инструмента с собственным приводом. Наножидкости были приготовлены путем диспергирования наночастиц Al_2O_3 и МУНТ в пальмовом масле при фиксированных концентрациях. Анализ износа инструмента выполнялся с помощью оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Кроме того, исследуется влияние

режимов резания на радиальные параметры GD&T (круглость, цилиндричность, радиальное биение), шероховатость поверхности, стойкость инструмента и степень наклепа в подповерхностном слое. Для генерации Парето-оптимальных решений и выбора наилучшего компромиссного варианта также использовался метод TOPSIS в сочетании с генетическим алгоритмом (GA). В заключении представлены результаты, полученные с оптимизированными параметрами.

Методы исследования

В последнее десятилетие проведены обширные исследования в области механической обработки с использованием наножидкостей, которые состоят из базовой жидкости и диспергированных в ней наночастиц. Введение наночастиц интенсифицирует теплоперенос, что положительно сказывается на технологических показателях процесса. Ключевым фактором при этом является контроль агломерации наночастиц, вероятность которой возрастает с повышением их концентрации. В настоящей работе для исследований использовалась гибридная наножидкость, полученная диспергированием наночастиц Al_2O_3 и многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в растительном пальмовом масле. Выбор данного базового масла обусловлен его высокой теплопроводностью, хорошими смазывающими свойствами и коррозионной стойкостью. Характеристики примененных наночастиц приведены в табл. 1 [7].

Публикации [22–24] свидетельствуют о том, что наножидкости на основе Al_2O_3 и МУНТ характеризуются повышенной смазывающей способностью, что ведет к улучшению обрабатываемости. В данной работе гибридная наножидкость была приготовлена двухстадийным методом в соответствии с методикой, описанной в работе [7]; схема процесса представлена на рис. 1.

Для получения гибридной наножидкости без ПАВ со стабильной дисперсией наночастиц и без седиментации применялись механическое перемешивание, ультразвуковая диспергация и магнитное перемешивание. Ультразвуковая обработка разрушает агломераты, а магнитное перемешивание обеспечивает долговременную однородность суспензии. Оптимальная концентрация наночастиц в базовой жидкости была выбрана на основе предварительных экспериментов и анализа литературы. Увеличение концентрации, с одной стороны, улучшает теплоперенос, а с другой – приводит к росту вязкости. МУНТ характеризуются более высокой плотностью и вязкостью по сравнению с наночастицами Al_2O_3 , которые, в свою очередь, обладают меньшим краевым углом смачивания и большей теплопроводностью. Для достижения синергетического эффекта МУНТ и Al_2O_3 смешивали в равных объемных долях. В результате была приготовлена гибридная наножидкость на основе пальмового растительного масла с общей объемной концентрацией наночастиц 0,25 %.

Таблица 1

Table 1

Свойства наночастиц и гибридной наножидкости
Properties of nanoparticles and the hybrid nanofluid

Свойства	Наночастицы		Гибридная Al_2O_3 + MWCNTs наножидкость	
	Al_2O_3	MWCNTs		
Чистота	99,9 %	99 %	Плотность, г/см ³	0,945
Средний размер частиц, нм	20...50	10...30	Вязкость, сП	212
Средний внутренний диаметр, нм	–	5...10	Кислотное число, КОН/г	4,61
Средняя длина / поперечный размер	–	5 нм	Поверхностное натяжение, Н/м	43,02
Насыпная плотность, г/см ³	0,5	0,04	Угол смачивания, град	32,55
Морфология	Сферическая	Пластинчатая	Теплопроводность, Вт/(м·°C)	0,213
Цвет	Белый	Черный		



Рис. 1. Приготовление гибридной наножидкости

Fig. 1. Preparation of a hybrid nanofluid

Процесс приготовления включал в себя три стадии: первоначальное механическое перемешивание при 700 об/мин в течение 20 мин для грубого диспергирования, последующую ультразвуковую обработку погружным диспергатором в течение 30 мин для деагломерации и финальное магнитное перемешивание в течение 30 мин для предотвращения осаждения наночастиц и обеспечения равномерной подачи жидкости в зону резания. Характеристики полученной наножидкости (плотность, кислотное число, смазываемость, вязкость, поверхностное натяжение и теплопроводность) приведены в табл. 1.

План эксперимента

Экспериментальные исследования стойкости инструмента, шероховатости поверхности и радиальных параметров GD&T выполнялись при точении сплава Inconel 718 на станке с ЧПУ, при этом использовался ротационный инструмент с собственным приводом и гибридная наножидкость $Al_2O_3 + MWCNT$ в условиях минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости (MQL). Режимы резания, геометрия и размеры

инструмента были определены в ходе предварительных испытаний для данной пары «инструмент – материал». Химический состав заготовки приведен в табл. 2. План эксперимента включал в себя девять опытов с варьированием трех факторов: скорости подачи (0,1; 0,2; 0,3 мм/об), скорости резания (30; 50; 65 м/мин) и глубины резания (0,2; 0,5; 0,8 мм).

Испытания проводили с использованием вращающегося твердосплавного инструмента. На рис. 2 показан специально разработанный ротационный инструмент с собственным приводом, примененный в данном исследовании. Конструкция ротационного инструмента с собственным приводом включает в себя комбинированную систему игольчатых и упорных подшипников для поддержки вала вращающейся пластины, что обеспечивает его соосность и стабильность под нагрузкой, а также высокую точность инструмента при обработке с большими силами резания. Использовалась круглая твердосплавная поворотная пластина RCMT1606M0MP (диаметр 16 мм, толщина 6 мм, задний угол 7°). Угол наклона и передний угол державки были

Таблица 2

Table 2

Химический состав сплава Inconel 718 (масс. %)

Chemical composition of Inconel 718 (wt %)

C	Cr	Al	Ti	P + S	Si + B	Ni	Mo	Mn	Nb + Ta	Co	Fe
0,005	18,37	0,35	1,10	0,015	0,057	52,82	2,87	0,062	5,01	0,22	Основа

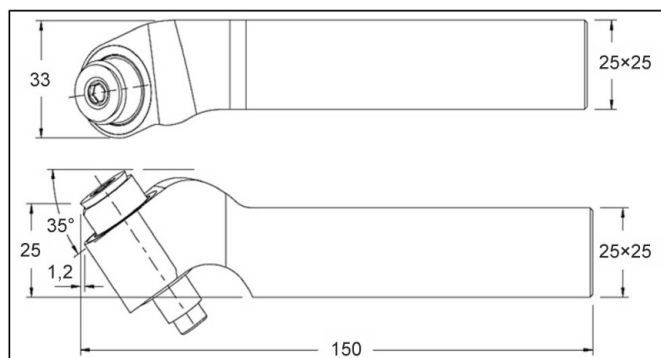


Рис. 2. Геометрия ротационного инструмента с собственным приводом (SPRT)

Fig. 2. Geometry of the self-propelled rotary tool

установлены на 6° и 35° соответственно. Экспериментальная установка представлена на рис. 3. Подробные инструкции по эксплуатации и технические характеристики специально разработанного ротационного инструмента с собственным приводом приведены в источнике [13].

В данном исследовании изучалась зависимость радиальных параметров GD&T – круглости, цилиндричности и радиального биения – от режимов резания. Круглость и цилиндричность количественно определяют отклонение элемента от идеальной окружности и идеального цилиндра соответственно. Отклонение от круглости определяется как минимальное радиальное расстояние между двумя концентрическими

окружностями, охватывающими реальный профиль поперечного сечения. Оно устанавливается путем анализа кругового поперечного сечения цилиндрической детали.

Для обеспечения функциональных характеристик ответственных деталей установления допуска только на круглость недостаточно, требуется также нормирование допуска на цилиндричность, что позволяет ограничить отклонения формы и гарантировать ее цилиндричность. Радиальное биение является двухмерным допуском, который может быть измерен в осевом или радиальном направлении и характеризует отклонение поверхности при вращении детали относительно базовой оси.

Измерение шероховатости поверхности выполняли профилометром Mahr MarSurf M400. Приведенное значение среднего арифметического отклонения профиля (R_a) рассчитано как среднее из измерений в четырех равноотстоящих на 90° точках по окружности образца.

Твердость обработанной поверхности (слоя с наклепом) определяли на цифровом твердомере по Роквеллу. Износ инструмента оценивали с использованием цифрового микроскопа Dino-Lite. Критерием окончания стойкости инструмента в соответствии со стандартом ISO 3685 служило достижение величины износа по задней поверхности значения 0,2 мм или возникновение катастрофического разрушения [1, 13]. Изме-

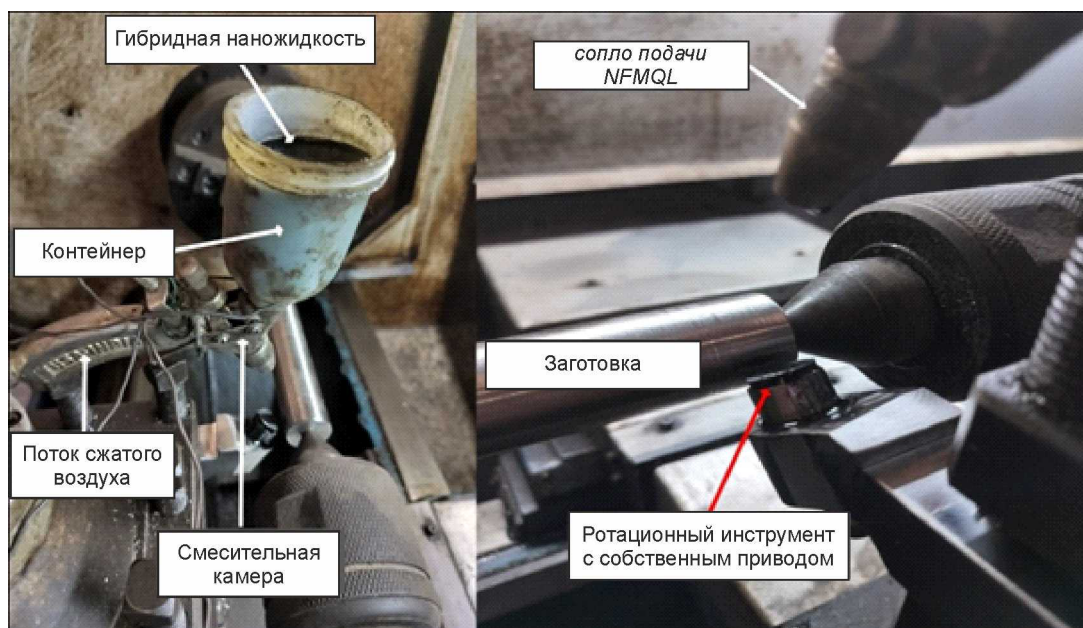


Рис. 3. Экспериментальная установка

Fig. 3. Experimental setup

рение радиального биения, цилиндричности и круглости проводили на мостовом координатно-измерительном станке (КИМ) Carl Zeiss Contura с диапазоном измерений 1200×800×800 мм. Каждый опыт повторяли трижды; в статье представлены усредненные результаты. Для обеспечения воспроизводимости все испытания выполнялись при контролируемой температуре окружающей среды, а измерительное оборудование и образцы перед измерениями очищались изопропиловым спиртом и высушивались безворсовыми салфетками.

Результаты и их обсуждение

В разделе представлены результаты, проанализированные методами многокритериальной оптимизации и математического моделирования. Качество точения оценивалось по радиальным параметрам геометрических допусков (круглость, цилиндричность, радиальное биение), стойкости инструмента, шероховатости поверхности и твердости подповерхностного слоя. Рассмотрено также влияние режимов резания на механизмы износа инструмента и морфологию стружки. Средние значения исследуемых откликов приведены в табл. 3.

Каждый опыт повторяли три раза; приведенные данные представляют собой средние арифметические значения. Усреднение использовалось для повышения точности, учета нестационарности процесса и подавления влияния

выпадающих значений. Анализ показал, что разброс значений откликов составляет 15–20 %, что свидетельствует о заметной вариабельности характеристик процесса.

Круглость определяли на одном поперечном сечении детали путем ее вращения вокруг оси для снятия полного профиля. Отклонение от круглости, представляющее собой разность между максимальным и минимальным радиусами, рассчитывали по трем профилям для выявления погрешностей и определения среднего значения. Цилиндричность оценивали по радиальному отклонению между экстремальными значениями на нескольких сечениях вдоль образующей цилиндра. Отклонение от цилиндричности измеряли с использованием программного обеспечения КИМ, что позволило минимизировать ошибку оператора благодаря автоматической регистрации координат X , Y и Z .

Анализ износа, твердости и разработка моделей

Износ инструмента контролировали с помощью оптической микроскопии, а твердость подповерхностного слоя измеряли на цифровом твердомере по Роквеллу. Прибор автоматически рассчитывает твердость по глубине внедрения индентора, что минимизирует погрешность оператора. На рис. 4 и 5 представлена зависимость отклонений от круглости и радиального биения от условий обработки (табл. 3). По экспериментальным данным были получены математиче-

Таблица 3

Table 3

Условия испытаний и измеренные отклики

Test conditions and measured responses

Эксп. прогон	V , м/мин: f мм/об: d , мм	Отклонение		Радиальное биение (R/O), мм	Шероховатость поверхности (Ra), мкм	Стойкость инструмента (TL), мин	Твердость заготовки (HRC)
		круглости (CIR), мкм	цилиндричности (CYL), мкм				
$R1$	30:0,1:0,8	8,1	60,9	0,77	1,51	5,37	36,81
$R2$	30:0,3:0,8	9,2	72,8	1,07	2,44	3,91	37,67
$R3$	65:0,1:0,8	8	29,7	0,57	1,32	2,03	38,17
$R4$	65:0,3:0,8	9	66,7	0,64	1,63	1,12	39,56
$R5$	50:0,2:0,5	6,6	29,1	0,44	1,67	1,72	37,57
$R6$	30:0,1:0,2	3,3	10,1	0,19	1,48	8,42	36,25
$R7$	30:0,3:0,2	6,3	17,4	0,34	1,81	5,82	36,53
$R8$	65:0,1:0,2	2,9	7,5	0,11	1,05	3,81	38,65
$R9$	65:0,3:0,2	4,4	12,1	0,25	1,36	2,96	38,84

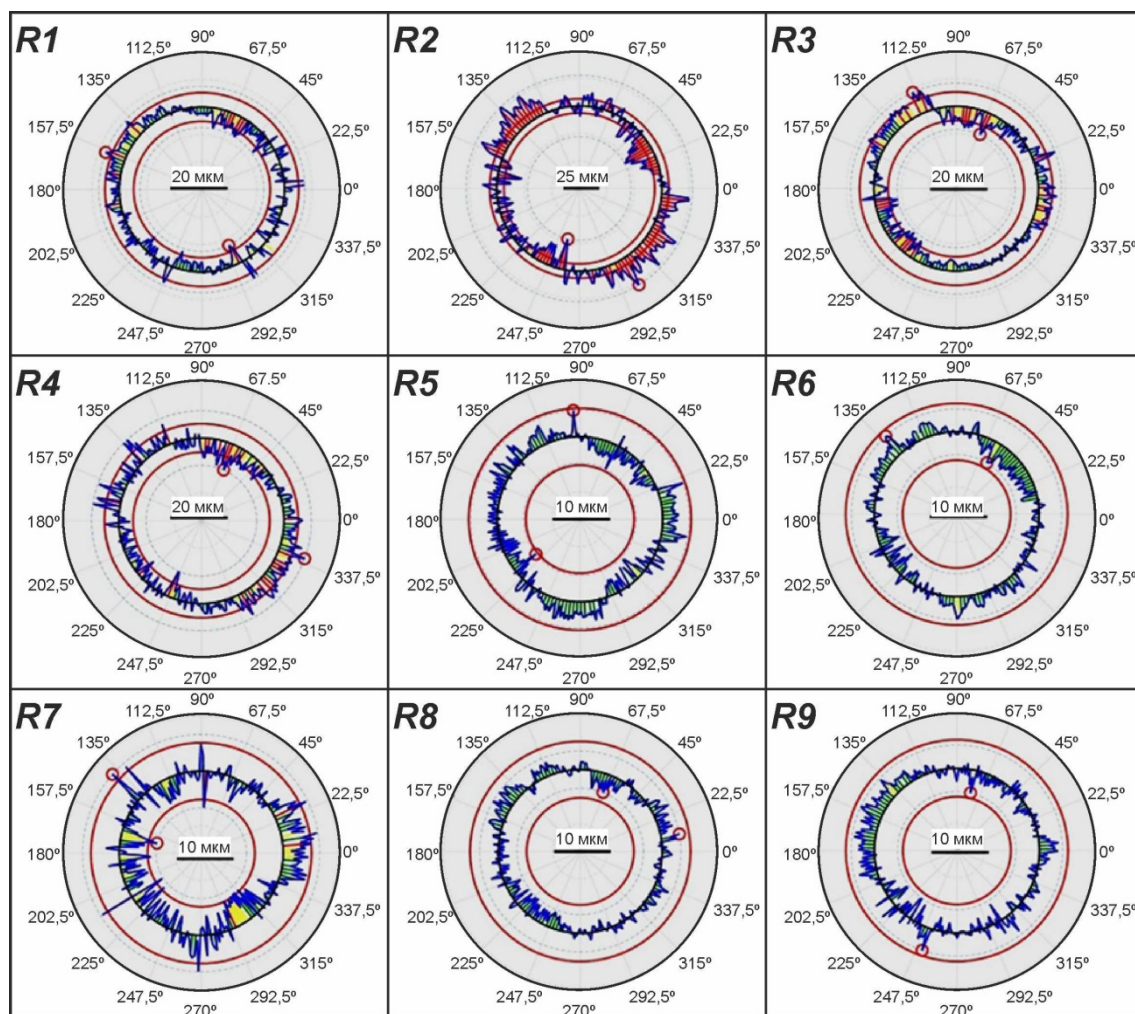


Рис. 4. Графики отклонения от круглости для различных экспериментальных прогонов (с R1 по R9)

Fig. 4. Circularity deviation plots for different experimental runs (R1 to R9)

ские модели (табл. 4) для анализа влияния параметров на исследуемые отклики. Коэффициенты уравнений определены регрессионным анализом в среде DataFit. Уравнения (1–6) в табл. 4 являются эмпирическими моделями для прогноза откликов. Значения коэффициента детерминации $R^2 \approx 0,95$ свидетельствуют о высокой объясненной доле дисперсии и надежности моделей для прогнозирования процесса точения сплава Inconel 718.

Для визуализации влияния входных параметров по эмпирическим уравнениям были построены графики. Использовался подход с варьированием одного фактора при фиксированных средних уровнях остальных. Это позволяет системно оценить индивидуальный вклад каждого параметра в изменение откликов. На рис. 6 и 7 приведены рассчитанные по уравнениям (1–6) прогнозные зависимости. Для сравнения на тех же рисунках показаны отклики

в случае сухого резания, предсказанные моделями для ротационного инструмента с собственным приводом [11].

На рис. 6 показана динамика отклонений от круглости (CIR) и цилиндричности (CYL), а также твердости в условиях сухого резания и MQL с наножидкостью (NFMQL) в зависимости от следующих параметров:

- от скорости резания (V) при $f = 0,2$ мм/об, $d = 0,5$ мм;
- подачи (f) при $V = 50$ м/мин, $d = 0,5$ мм;
- глубины резания (d) при $V = 50$ м/мин, $f = 0,2$ мм/об.

На рис. 7 представлены соответствующие изменения радиального биения (R/O), средней шероховатости Ra и стойкости инструмента (TL) для тех же комбинаций условий.

Анализ рис. 6 и 7 показывает, что все исследуемые выходные характеристики, кроме твер-

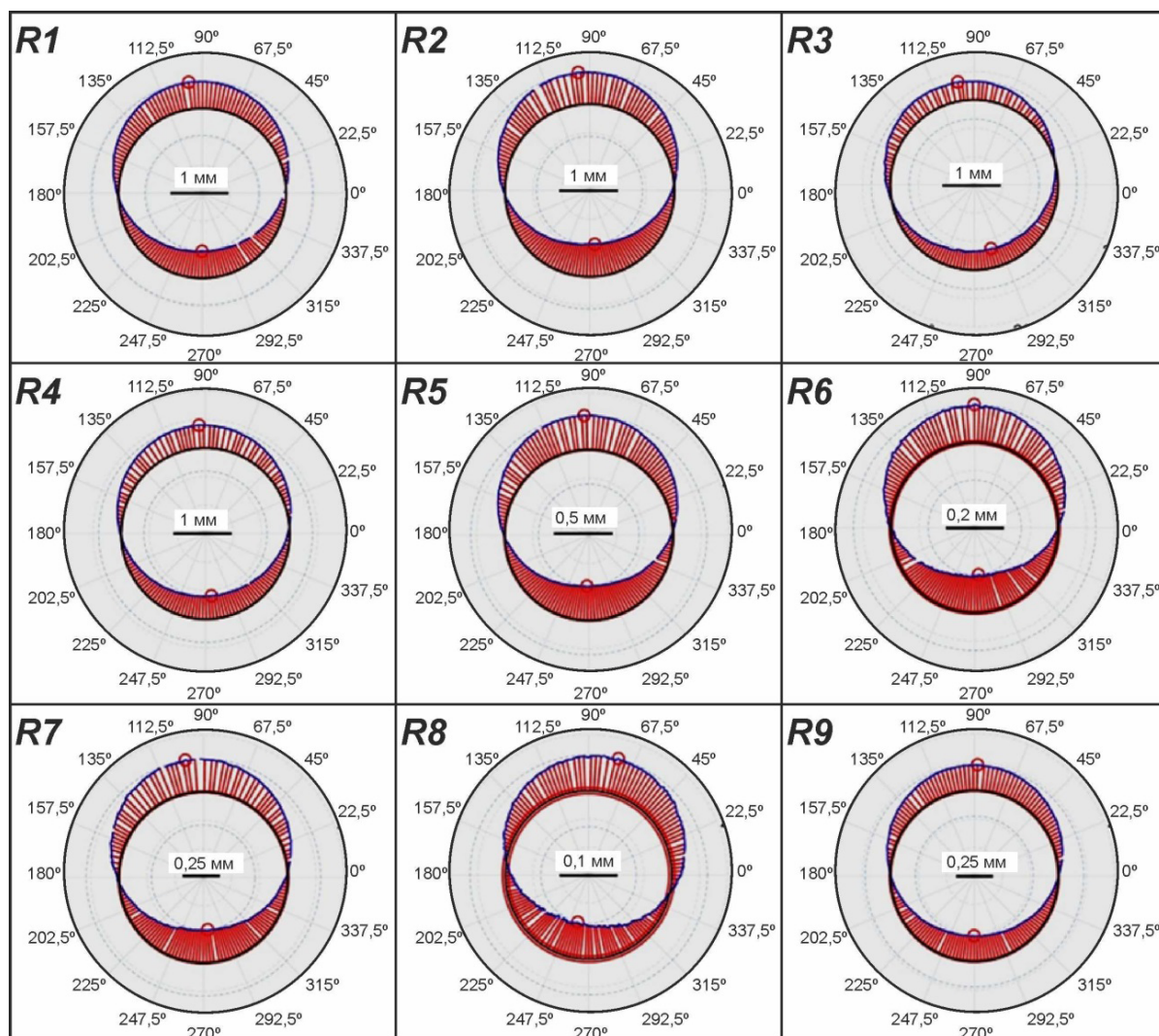


Рис. 5. Графики радиального биения для различных экспериментальных прогонов (с R1 по R9)

Fig. 5. Radial runout plots for different experimental runs (R1 to R9)

Таблица 4

Table 4

Математические модели исследуемых откликов на основе экспериментальных данных

Mathematical models for examined responses based on experimental data

Отклик	Разработанная модель	Значение R^2	№ уравнения
Отклонение от круглости (CIR), мкм	$= 18,8735V^{-0,0963} f^{0,187} d^{0,4944}$	0,9144	(1)
Отклонение от цилиндричности (CYL), мкм	$= 547,932V^{-0,3668} f^{0,361} d^{1,1768}$	0,9452	(2)
Радиальное биение (R/O), мм	$= 12,165V^{-0,566} f^{0,2681} d^{0,8842}$	0,9812	(3)
Шероховатость поверхности (Ra), мкм	$= 12,73V^{-0,389} f^{0,2881} d^{0,1467}$	0,9211	(4)
Стойкость инструмента (TL), мин	$= 110,042V^{-1,152} f^{-0,3377} d^{-0,3648}$	0,96515	(5)
Твердость заготовки (HRC)	$= 30,3477V^{0,0666} f^{0,0156} d^{0,0082}$	0,8825	(6)

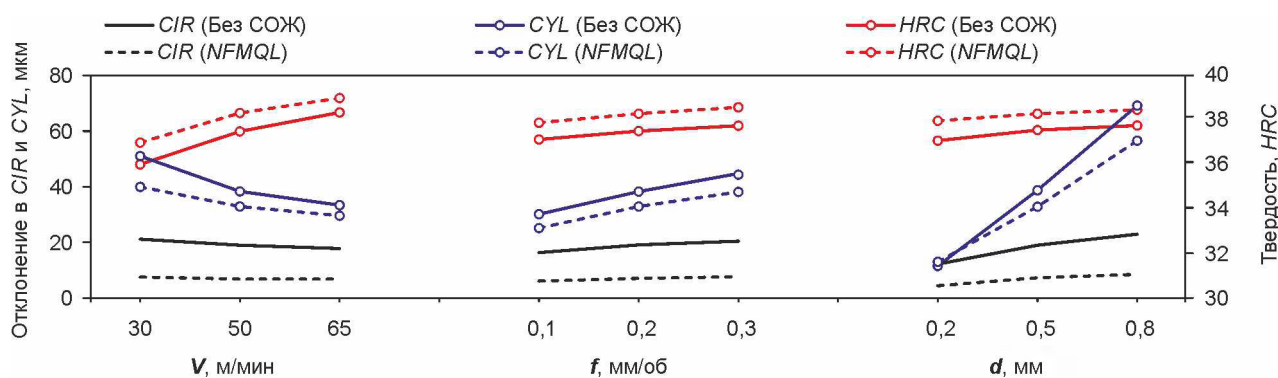


Рис. 6. Изменение отклонения от круглости (CIR), цилиндричности (CYL) и твердости (HRC) для условий сухого резания и с NFMQL

Fig. 6. Variation in deviation in circularity (CIR), cylindricity (CYL), and hardness (HRC) for dry and NFMQL conditions

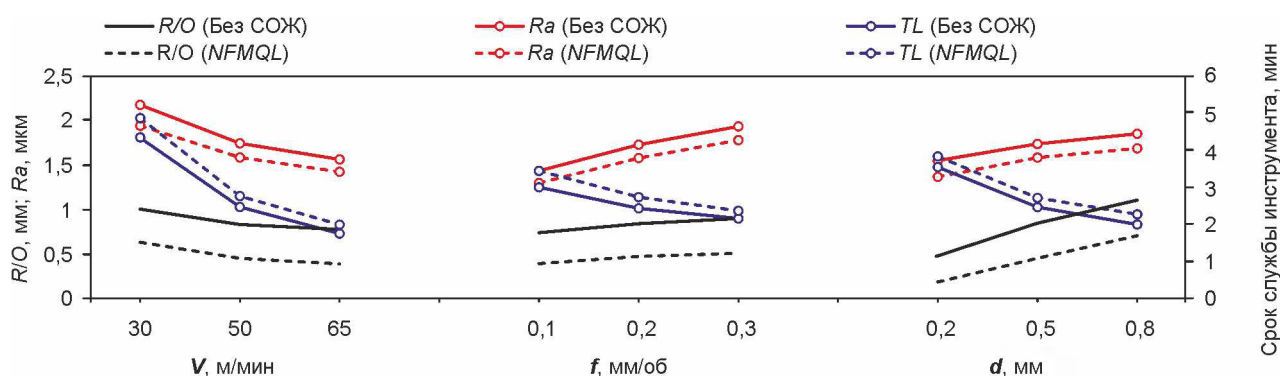


Рис. 7. Изменение радиального биения (R/O), шероховатости поверхности (Ra) и стойкости инструмента (TL) для условий сухого резания и с NFMQL

Fig. 7. Variation in radial runout (R/O), surface roughness (Ra), and tool life (TL) for dry and NFMQL conditions

дости заготовки, улучшаются (их значения снижаются) с ростом скорости резания (V). Однако стойкость инструмента при этом существенно падает, что указывает на целесообразность применения пониженных скоростей для ее увеличения. Указанный негативный эффект ослабляется при использовании гибридной наножидкости (NFMQL) по сравнению с сухим резанием. В то же время применение NFMQL на повышенных скоростях позволяет добиться лучших результатов по сравнению с сухой обработкой: получаются меньшие отклонения от цилиндричности и круглости, снижается шероховатость поверхности и радиальное биение. Таким образом, повышение скорости резания оказывает разнонаправленное влияние, создавая конфликт между целью максимизации стойкости инструмента, с одной стороны, и целями улучшения параметров GD&T и ше-

роховатости – с другой. Зависимость твердости заготовки от скорости резания оказалась незначительной.

Улучшение качества поверхности (снижение Ra) и геометрической точности (цилиндричность, биение, круглость) при высоких значениях V объясняется ростом температуры в зоне резания. Это снижает склонность материала к адгезии и налипанию на режущую кромку, минимизируя тем самым образование неровностей. Более высокая температура также может вызывать термомеханическое разупрочнение материала в непосредственной близости от лезвия, что облегчает процесс стружкообразования, снижает силы резания и в итоге улучшает чистоту поверхности и точность формы. Кроме того, повышенные скорости способствуют более эффективному отводу стружки, предотвращая ее повторное внедрение в обработанную поверхность

и позволяя выдерживать заданные жесткие допуски.

Однако повышенные температуры при высоких скоростях резания могут приводить к разупрочнению инструмента, снижая его твердость и прочность. Снижение твердости и прочности инструмента ускоряет его износ и деформацию. Совокупное термическое и силовое воздействие повышает риск выкрашивания и поломки режущей кромки, что напрямую сокращает стойкость. Все перечисленные деградационные процессы проявляются значительно сильнее при сухом резании, чем при использовании NFMQL.

Согласно данным рис. 6 и 7, увеличение подачи (f) приводит к снижению стойкости инструмента при одновременном ухудшении радиальных параметров GD&T и шероховатости Ra . Таким образом, при выборе подачи возникает конфликт целей между стойкостью и качеством обработки. Напротив, увеличение глубины резания (d) вызывает рост всех исследуемых откликов, кроме стойкости инструмента. Глубина резания оказывает наиболее сильное влияние на параметры формы, особенно на цилиндричность и радиальное биение. Следовательно, для минимизации этих отклонений необходимо ограничивать d . Эта зависимость также выражена сильнее при сухом резании. Оптимальные результаты – максимальная стойкость инструмента в сочетании с минимальными значениями Ra и отклонений GD&T – достигаются при использовании NFMQL и сниженных значениях подачи и глубины резания. Влияние этих параметров на твердость заготовки пренебрежимо мало.

Радиальные параметры GD&T демонстрируют наибольшую чувствительность к изменению глубины резания (d), чем к подаче (f) или скорости (V), что особенно заметно при сухой обработке. Это объясняется доминирующим влиянием глубины резания на силу резания, которая непосредственно определяет объем снимаемого материала. Изменение d также модифицирует толщину стружки и площадь контакта, что дополнительно влияет на силовую нагрузку и итоговую геометрию детали. Подача и скорость, в первую очередь определяющие производительность, оказывают меньшее прямое воздействие на геометрические допуски. Стойкость инструмента (TL) наиболее сильно зависит от скорости резания (V), а шероховатость поверхности (Ra)

– от подачи (f). Все установленные зависимости носят более выраженный характер в условиях сухого резания по сравнению с NFMQL.

Таким образом, очевидно, что радиальные параметры GD&T, в особенности отклонение от цилиндричности, возрастают с увеличением глубины резания (d) и подачи (f), но уменьшаются при повышении скорости резания (V). Эта тенденция отражена в уравнениях (1–3) относительно высокими положительными показателями степени для d и f (в таком порядке) и отрицательным показателем для V . Полученные результаты подтверждают, что глубина резания оказывает наиболее существенное влияние на радиальные параметры GD&T, скорость резания в основном определяет стойкость инструмента, а подача является доминирующим фактором для шероховатости поверхности (Ra).

Скорость резания (V) оказывает комплексное влияние на Ra и TL. Сопутствующий рост температуры может повышать пластичность материала, облегчая его деформирование и снижая Ra . Высокие скорости также подавляют образование нароста на кромке – основного источника погрешностей формы и шероховатости. Кроме того, они способствуют формированию более мелкой и непрерывной стружки, а также сокращают время силового и температурного воздействия инструмента на заготовку, что в совокупности улучшает точность формы и чистоту поверхности.

Однако более высокие скорости резания ускоряют износ инструмента и увеличивают риск выкрашивания режущей кромки, поскольку прилипший материал с большей вероятностью отрывается. Следовательно, оптимизация скорости резания имеет решающее значение для баланса между достижимым качеством поверхности и долговечностью инструмента. Пагубное влияние высоких скоростей резания на износ инструмента может быть смягчено эффективными стратегиями смазки и охлаждения, такими как NFMQL. Для более глубокого понимания поведения инструмента далее обсуждается анализ износа ротационного инструмента с собственным приводом, учитывая влияние условий резания.

Снижение стойкости инструмента и увеличение отклонений радиальных параметров GD&T при более высоких значениях f и d можно объ-

яснить возросшими силами резания. Эти большие силы вызывают более высокое напряжение в инструменте, приводящее к ускоренному износу. Они также порождают более выраженные вибрации, которые негативно сказываются на чистоте поверхности и точности геометрических характеристик. В целом более высокие значения подачи и глубины резания приводят к увеличению сил резания и тепловыделения, что ускоряет износ инструмента, ухудшает качество поверхности и вызывает большие отклонения геометрических допусков обработанной детали.

Анализ износа инструмента

При механической обработке сплава Inconel 718 сдвиговая неустойчивость и локализованная деформация негативно влияют на износ инструмента, целостность поверхности и общую обрабатываемость. Ниже представлен анализ износа специально разработанного ротационного инструмента с собственным приводом в условиях NFMQL.

Исследование изношенных инструментов при различных условиях обработки проводилось с помощью цифровой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), как показано на рис. 8. На изображениях представлены задние поверхности инструментов после завершения обработки, которая была остановлена либо из-за катастрофического разрушения, либо по достижении предельного значения износа по задней поверхности в 0,2 мм.

На рис. 8, *а* и *б* представлены микрографии режущих кромок ротационного инструмента с собственным приводом, полученные в экспериментальных прогонах *R1* и *R5* соответственно. Режущие инструменты демонстрируют значительные повреждения, характеризующиеся адгезией металла и питтингом на подложке. Четко видно выкрашивание режущей кромки, вызванное отрывом прилипшего материала заготовки. Такой тип повреждения более выражен при повышенных скоростях резания. Более того, при высоких значениях V большинство отказов инструмента носило катастрофический характер и было вызвано именно выкрашиванием кромки. Относительно незначительная адгезия металла, наблюдаемая при низких скоростях, может быть объяснена снижением температур в зоне резания, что подавляет диффузионный износ, зависящий от температуры.

На рис. 9 и 10 представлены изображения вместе с результатами энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа (EDS) поверхностей инструментов из прогонов *R1* и *R5* соответственно. Элементный анализ (весовой процент), выполненный методом EDS, подтверждает адгезию компонентов сплава Inconel 718 на переднюю поверхность инструмента. Явно видны значительный питтинг, пластическая деформация и разрушение режущей кромки с прилипшим металлом, особенно при высоких скоростях резания. Это демонстрирует, что скорость резания является критическим фактором, определяющим интенсивность износа инструмента

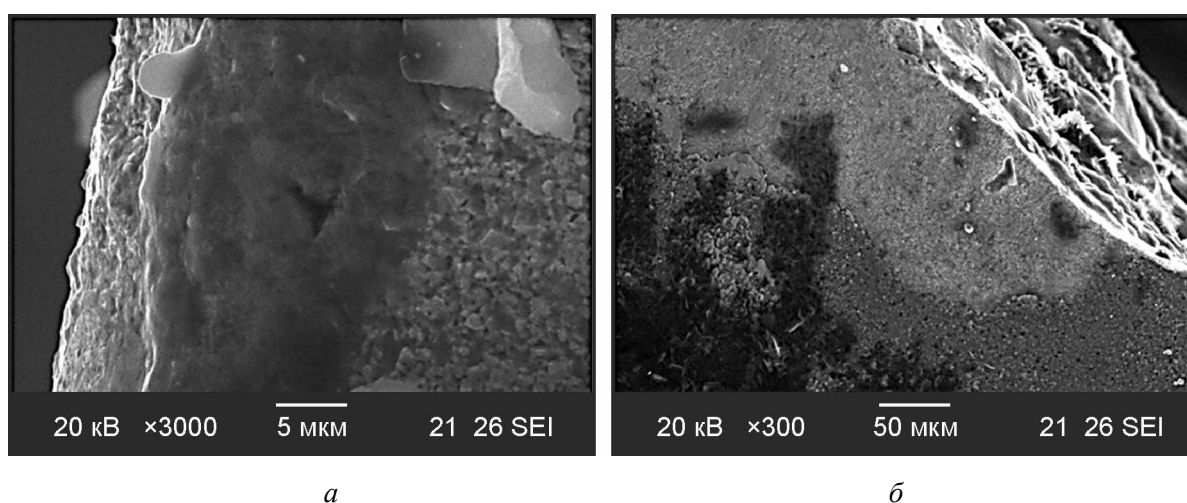


Рис. 8. СЭМ-изображения инструментов после экспериментальных прогонов *R1* и *R5*

Fig. 8. SEM images of tools at experimental runs *R1* and *R5*

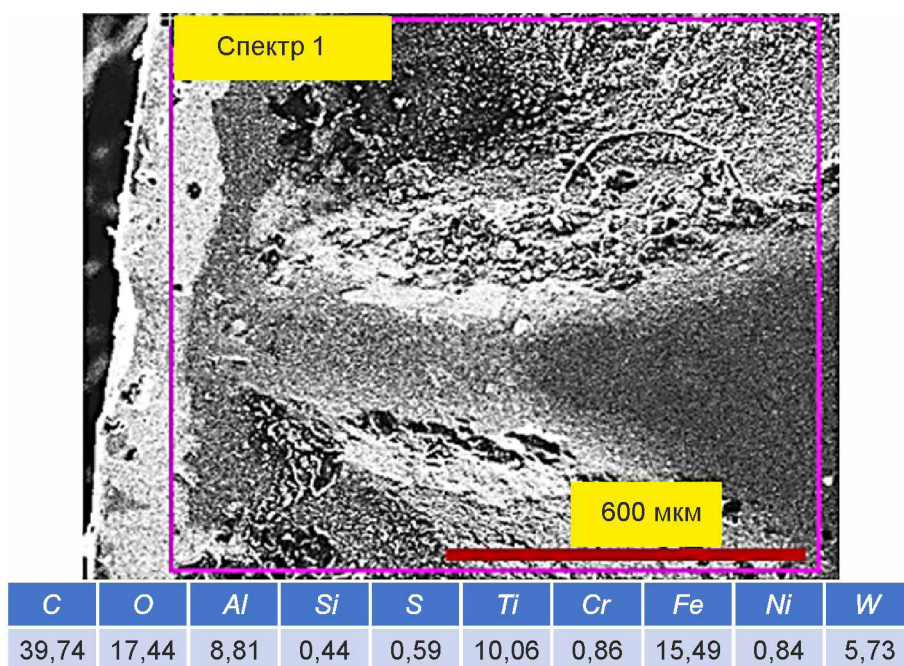


Рис. 9. Изображение инструмента с результатами EDS-анализа после экспериментального прогона R1

Fig. 9. Tool image with EDS analysis after experimental run R1

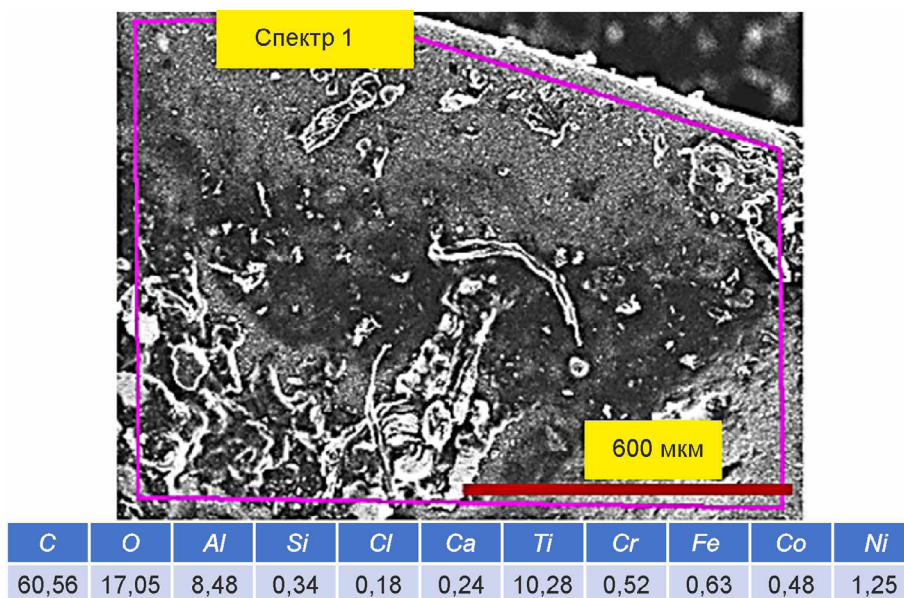


Рис. 10. Изображение инструмента с результатами EDS-анализа после экспериментального прогона R5

Fig. 10. Tool image with EDS analysis after experimental run R5

и степень адгезии металла в процессе обработки. Полученные данные согласуются с результатами, приведенными в [11–13].

Обсуждается также морфология стружки, образующейся при сухой обработке Inconel 718 ротационным инструментом с собственным

приводом. Образующаяся стружка представляла собой непрерывно свернутую винтовую стружку с зазубренной (пилообразной) кромкой. Практически на всех рассмотренных в настоящем исследовании режимах резания образовывалась туго свернутая винтовая стружка.

Эта характеристика была наиболее выражена при более высоких скоростях резания (V). Настоящие выводы согласуются с данными работ [1, 7].

Скручивание стружки в первую очередь зависит от теплопроводности инструмента и температурного градиента между контактной и свободной поверхностями стружки. Более высокий температурный градиент приводит к меньшему радиусу скручивания стружки [7]. На рис. 11 показаны поверхности стружки, полученные ближе к концу стойкости инструмента в экспериментальных прогонах R1 и R5. Стружка, сгенерированная сильно изношенным инструментом, демонстрирует значительные повреждения, нерегулярную пластическую деформацию и следы абразивного износа на свободной поверхности. Это наблюдение подчеркивает важность своевременной замены инструмента для поддержания качества обработки.

Многокритериальная оптимизация

Результаты экспериментов показывают, что при точении Inconel 718 ротационным инструментом с собственным приводом глубина резания (d) является наиболее значимым параметром для улучшения параметров GD&T, подача (f) доминирует для качества поверхности, а скорость резания (V) наиболее критична для стойкости инструмента. Преимущественные параметры GD&T и качество поверхности могут быть достигнуты выбором меньших значений d и f в сочетании с более высокой скоро-

стью V . Напротив, использование более низких режимов резания способствует увеличению срока службы инструмента. Таким образом, существует конфликт между достижением лучшего качества детали и продлением стойкости инструмента. Следовательно, многопараметрическая оптимизация необходима для одновременного улучшения всех откликов, рассматриваемых в данном исследовании.

Многокритериальный генетический алгоритм (multi-objective genetic algorithm, MOGA) эффективен для исследования пространства решений. Решения MOGA представляются в виде фронта Парето. Хотя генетическая оптимизация дает множество оптимальных компромиссных решений, но для определения единственного наилучшего компромисса требуется дополнительный анализ. Следовательно, использование методов принятия многокритериальных решений (multi-criteria decision-making, MCDM) необходимо для ранжирования Парето-оптимальных решений. Техники MCDM позволяют расставить приоритеты решений на основе различных критериев, облегчая выбор наиболее подходящего компромисса. Таким образом, интеграция MOGA с MCDM позволяет упростить сложный многоцелевой процесс принятия решений для достижения оптимального компромиссного решения.

Здесь описывается гибридная Парето-ориентированная стратегия GA-TOPSIS, используемая для анализа компромиссов и определения оптимальных параметров [25]. Метод

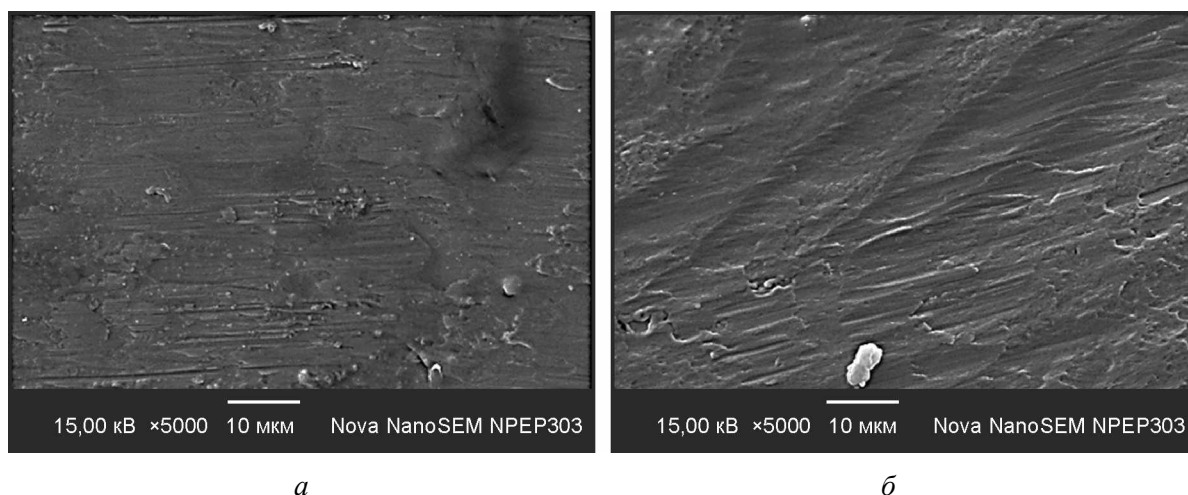


Рис. 11. Изображения свободных поверхностей стружки после экспериментальных прогонов R1 и R5

Fig. 11. Chip images of the free surfaces after experimental runs R1 and R5

GA-TOPSIS сочетает способность GA исследовать широкий спектр решений с возможностью TOPSIS выбирать лучший компромиссный вариант. Сначала GA осуществляет поиск в пространстве параметров и генерирует фронт Парето. Впоследствии TOPSIS ранжирует эти варианты на основе их близости к идеальному решению.

Оптимизация на основе GA выполнялась с использованием разработанных уравнений (1–6) в MATLAB. Диапазоны варьирования факторов были заданы следующими границами: для скорости резания (V) – от 30 до 65 м/мин, для подачи (f) – от 0,1 до 0,3 мм/об, для глубины резания (d) – от 0,2 до 0,8 мм. Алгоритм осуществляет итеративный поиск комбинаций параметров в заданных пределах для нахождения решений, обеспечивающих одновременную оптимизацию конфликтующих целевых функций.

В настройках оптимизатора не устанавливались ограничения по времени, значению функции пригодности (fitness) и времени стагнации. Лимит поколений без улучшения (предел стагнации) был задан равным 100. Для достижения баланса между точностью решения и вычислительными затратами допуск сходимости функции и ограничений установлен на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ соответственно. Алгоритм был настроен на останов после приблизительно 200 поколений. Остальные параметры многоцелевого генетического оптимизатора оставались значениями по умолчанию. Был выбран тип популяции Double Vector. Для повышения вероятности отбора более приспособленных особей применялась турнирная селекция. В работе использовались операторы прямой миграции и промежуточного скрещивания. Такая комбинация операторов способствует поддержанию разнообразия популяции и ее адаптивности, предотвращает преждевременную сходимость к локальному оптимуму и обеспечивает эффективное исследование пространства поиска.

В результате оптимизации был получен набор Парето-оптимальных решений, сгенерированных GA. Фронт Парето, представляющий собой множество недоминируемых решений, приведен в табл. 5, он наглядно демонстрирует существующие компромиссы между целевыми функциями: любое решение, принадлежащее фронту, невозможно улучшить по одному критерию без ухудшения другого. Анализ фронта по-

зволяет выбрать окончательное решение с учетом заданных приоритетов [8, 25].

Для выбора единственного наилучшего компромиссного решения из множества, представленного в табл. 5, использовался метод TOPSIS. Стандартная процедура TOPSIS включает определение положительного идеального решения (positive ideal solution, PIS) и отрицательного идеального решения (negative ideal solution, NIS) [26]. Каждая альтернатива оценивается на основе евклидова расстояния до PIS и NIS. PIS представляет собой гипотетическое решение, максимизирующее выгодные критерии и минимизирующее затратные, в то время как NIS действует противоположным образом. На следующем этапе вычисляется коэффициент относительной близости каждой альтернативы к NIS, значение которого лежит в интервале от 0 до 1. Решение с коэффициентом, более близким к единице, считается более предпочтительным. Ранжирование альтернатив по убыванию данного коэффициента позволяет однозначно идентифицировать наилучшее компромиссное решение в Парето-множестве.

Подробное описание методологии TOPSIS, примененной в работе, приведено в источниках [8, 11]. В рамках настоящего исследования для обработки решений, сгенерированных генетическим алгоритмом (табл. 5), был выполнен следующий порядок действий. Сначала проводилась нормализация исходных данных. Затем каждый столбец нормализованной матрицы умножался на соответствующий весовой коэффициент отклика, в результате чего формировалась взвешенная нормализованная матрица решений. На следующем этапе определялись положительное (PIS) и отрицательное (NIS) идеальные решения. После этого для каждой альтернативы рассчитывалось евклидово расстояние до PIS и NIS. Завершающим шагом являлось вычисление коэффициента относительной близости (индекса схожести с идеальным решением) для всех альтернатив.

Для объективного определения весовых коэффициентов откликов использовался метод энтропийных весов (entropy weight method, EWM), который позволяет минимизировать субъективность за счет учета внутренней вариативности данных. Алгоритм расчета весов по методу EWM детально изложен в [8, 11]. Критерием выбора наилучшего решения в рамках гибридного



**Генетический алгоритм: Решения по Парето для ротационного инструмента
с собственным приводом в условиях NFMQL**

Genetic algorithm: Pareto solutions for SPRT under NFMQL conditions

№ решения	V , м/мин	f , мм/об	d , мм	Отклонение		R/O , мм	Ra , мкм	TL, мин	HRC
				CIR, мкм	CYL, мкм				
1	30,00	0,10	0,20	4,03	10,51	0,23	1,39	8,44	36,26
2	60,91	0,11	0,20	3,80	8,28	0,16	1,07	3,69	38,03
3	63,56	0,30	0,80	9,03	59,31	0,69	1,73	1,50	39,20
4	62,98	0,20	0,46	6,44	27,40	0,39	1,44	2,11	38,77
5	59,58	0,30	0,77	8,91	57,94	0,69	1,76	1,65	39,01
6	61,90	0,23	0,70	8,04	46,21	0,58	1,58	1,79	38,91
7	60,69	0,17	0,61	7,09	35,27	0,47	1,43	2,14	38,63
8	64,84	0,30	0,80	9,03	59,02	0,68	1,72	1,47	39,25
9	64,84	0,30	0,80	9,03	59,02	0,68	1,72	1,47	39,25
10	63,35	0,29	0,70	8,46	50,81	0,61	1,69	1,59	39,14
11	30,05	0,10	0,40	5,68	23,83	0,43	1,54	6,53	36,47
12	59,49	0,13	0,22	4,12	9,92	0,18	1,15	3,46	38,10
13	61,56	0,30	0,75	8,79	55,83	0,66	1,73	1,60	39,09
14	60,44	0,18	0,35	5,46	18,82	0,30	1,35	2,56	38,50
15	58,59	0,28	0,65	8,14	47,06	0,59	1,70	1,82	38,88
16	59,57	0,29	0,49	7,10	33,80	0,46	1,64	1,95	38,86
17	63,35	0,29	0,71	8,48	51,15	0,62	1,69	1,59	39,14
18	30,00	0,10	0,20	4,03	10,51	0,23	1,39	8,44	36,26

подхода GA-TOPSIS является максимизация его удаленности от NIS при одновременной минимизации расстояния до PIS.

В табл. 6 представлены нормализованные значения откликов и элементы взвешенной нормализованной матрицы решений. Табл. 7 содержит рассчитанные значения PIS и NIS, меры удаленности (расстояния) альтернатив от этих решений, коэффициенты относительной близости и итоговый рейтинг, полученный в результате применения GA-TOPSIS.

Согласно результатам, приведенным в табл. 7, пять решений с наивысшим рейтингом (№ 1, 18, 11, 2 и 12) образуют семейство квазиоптимальных решений.

Согласно данным табл. 8, содержащей пять наилучших решений по методу GA-TOPSIS, с точки зрения комплексного улучшения характеристик оптимальный набор параметров для точения сплава Inconel 718 ротационным инструментом с собственным приводом следу-

ющий: скорость резания $V = 30$ м/мин, подача $f = 0,1$ мм/об, глубина резания $d = 0,2$ мм. Прогнозируемые выходные параметры для этого режима: радиальное биение – 0,23 мм, отклонения от круглости и цилиндричности – приблизительно 11 мкм, средняя шероховатость поверхности Ra – 1,39 мкм, стойкость инструмента – 8,44 мин, твердость материала заготовки – 36,26 HRC.

В случае, когда приоритет отдается качеству обработанной детали в ущерб ресурсу инструмента, рекомендуется альтернативный набор параметров: $V = 61$ м/мин, $f = 0,13$ мм/об, $d = 0,22$ мм. Данный режим обеспечивает улучшенные геометрические характеристики: отклонения от круглости и цилиндричности не превышают 8,28 мкм, радиальное биение снижено до 0,16 мм, шероховатость Ra составляет 1,07 мкм, а твердость заготовки повышается до 38,03 HRC. Однако достижение этих показателей сопровождается сокращением стойкости инструмента до 3,46 мин.

Таблица 6

Table 6

GA-TOPSIS: Нормализованные результаты и нормализованная взвешенная матрица для различных откликов для ротационного инструмента с собственным приводом в условиях NFMQL

GA-TOPSIS: Normalized results and normalized weighted matrix for different responses for SPRT under NFMQL conditions

№ решения	Нормализованные результаты ($\times 10^{-2}$)						Нормализованная взвешенная матрица ($\times 10^{-2}$)					
	CIR	CYL	R/O	Ra	TL	HRC	CIR	CYL	R/O	Ra	TL	HRC
1	13,11	5,97	10,70	21,15	53,03	22,23	2,18	1,00	1,78	3,51	8,92	3,68
2	12,37	4,71	7,28	16,18	23,19	23,32	2,05	0,79	1,21	2,68	3,90	3,86
3	29,41	33,71	31,47	26,24	9,44	24,03	4,89	5,64	5,24	4,35	1,59	3,98
4	20,96	15,58	17,68	21,78	13,23	23,77	3,48	2,61	2,95	3,61	2,23	3,94
5	29,00	32,93	31,50	26,71	10,33	23,92	4,82	5,51	5,25	4,43	1,74	3,96
6	26,17	26,26	26,31	23,96	11,24	23,86	4,35	4,40	4,38	3,97	1,89	3,95
7	23,09	20,05	21,62	21,64	13,44	23,68	3,84	3,36	3,60	3,59	2,26	3,93
8	29,38	33,54	31,17	26,05	9,22	24,06	4,88	5,61	5,19	4,32	1,55	3,99
9	29,38	33,54	31,17	26,05	9,22	24,06	4,88	5,61	5,19	4,32	1,55	3,99
10	27,54	28,88	28,04	25,68	9,98	24,00	4,58	4,83	4,67	4,26	1,68	3,98
11	18,50	13,55	19,78	23,43	41,02	22,36	3,07	2,27	3,30	3,89	6,90	3,71
12	13,41	5,64	8,39	17,43	21,70	23,36	2,23	0,94	1,40	2,89	3,65	3,87
13	28,60	31,73	30,35	26,24	10,05	23,96	4,75	5,31	5,06	4,35	1,69	3,97
14	17,79	10,70	13,50	20,50	16,07	23,60	2,96	1,79	2,25	3,40	2,70	3,91
15	26,49	26,75	27,08	25,79	11,42	23,84	4,40	4,48	4,51	4,28	1,92	3,95
16	23,12	19,21	21,02	24,92	12,24	23,83	3,84	3,22	3,50	4,13	2,06	3,95
17	27,61	29,07	28,18	25,70	9,96	24,00	4,59	4,87	4,70	4,26	1,67	3,98
18	13,11	5,97	10,70	21,15	53,03	22,23	2,18	1,00	1,78	3,51	8,92	3,68

Таблица 7

Table 7

GA-TOPSIS: Оптимальные решения для ротационного инструмента с собственным приводом в условиях NFMQL

GA-TOPSIS: Optimal solutions for SPRT under NFMQL conditions

№ решения	V , м/мин	f , мм/об	d , мм	Меры удаленности ($\times 10^{-2}$)		Коэффициент близости (CC_i)	Ранг
				S^+	S^-		
1	30,00	0,10	0,20	0,01	0,08	0,887	1
2	60,91	0,11	0,20	0,05	0,08	0,611	4
3	63,56	0,30	0,80	0,10	0,05	0,346	17
4	62,98	0,20	0,46	0,07	0,06	0,460	7
5	59,58	0,30	0,77	0,10	0,05	0,344	18
6	61,90	0,23	0,70	0,09	0,05	0,378	10
7	60,69	0,17	0,61	0,08	0,06	0,425	8
8	64,84	0,30	0,80	0,10	0,05	0,347	15



Окончание табл. 7

The End Table 7

№ решения	V , м/мин	f , мм/об	d , мм	Меры удаленности ($\times 10^{-2}$)		Коэффициент близости (CC_i)	Ранг
				S^+	S^+		
9	64,84	0,30	0,80	0,10	0,05	0,347	15
10	63,35	0,29	0,70	0,09	0,05	0,362	12
11	30,05	0,10	0,40	0,04	0,06	0,631	3
12	59,49	0,13	0,22	0,05	0,08	0,592	5
13	61,56	0,30	0,75	0,10	0,05	0,350	14
14	60,44	0,18	0,35	0,06	0,07	0,513	6
15	58,59	0,28	0,65	0,09	0,05	0,370	11
16	59,57	0,29	0,49	0,08	0,06	0,421	9
17	63,35	0,29	0,71	0,09	0,05	0,362	13
18	30,00	0,10	0,20	0,01	0,08	0,887	1

Таблица 8

Table 8

GA-TOPSIS: Решения, занявшие первые пять мест, для ротационного инструмента с собственным приводом в условиях NFMQL

GA-TOPSIS: Solutions ranked 1 to 5 for SPRT under NFMQL conditions

Ранг	V , м/мин	f , мм/об	d , мм	CIR, мкм	CYL, мкм	R/O , мм	Ra , мкм	TL, мин	HRC
1	30,00	0,10	0,20	4,03	10,51	0,23	1,39	8,44	36,26
2	30,00	0,10	0,20	4,03	10,51	0,23	1,39	8,44	36,26
3	30,05	0,10	0,40	5,68	23,83	0,43	1,54	6,53	36,47
4	60,91	0,11	0,20	3,80	8,28	0,16	1,07	3,69	38,03
5	59,49	0,13	0,22	4,12	9,92	0,18	1,15	3,46	38,10

С целью валидации результатов оптимизации были выполнены эксперименты по точению с двумя различными оптимальными наборами режимов, указанными в табл. 9. Все представленные значения (шероховатость, стойкость, твердость, параметры GD&T) получены усреднением по трем повторным опытам. Сравнение с экспериментальными данными показывает хорошую сходимость: расхождение для большинства откликов не превышает 10 %.

Проведенное исследование подтверждает возможность эффективной обработки сплава Inconel 718 ротационным инструментом с собственным приводом в следующих режимах: скорость резания $V = 30 \dots 60$ м/мин, подача $f = 0,1$ мм/об, глубина резания $d = 0,2$ мм. При этом обеспечиваются следующие технологические

показатели: отклонения от круглости и цилиндричности < 11 мкм, радиальное биение $< 0,23$ мм, шероховатость поверхности $Ra = 1,07 \dots 1,39$ мкм, стойкость инструмента $TL = 3,46 \dots 8,44$ мин, твердость заготовки $36 \dots 38$ HRC.

Результаты настоящего исследования показывают, что применение ротационного инструмента с собственным приводом и гибридной наножидкости $Al_2O_3 + \text{МУНТ}$ в условиях MQL существенно повышает стойкость инструмента по сравнению с использованием обычных круглых инструментов при сухой обработке [13]. Это улучшение может быть объяснено усиленным теплоотводом, обусловленным вращением инструмента и превосходными теплофизическими свойствами гибридной наножидкости.

Таблица 9

Table 9

**Эксперименты по валидации для ротационного инструмента с собственным приводом
в условиях NFMQL**

Validation experiments for SPRT under NFMQL conditions

Показатели эффективности	Прогноз по методу GA-TOPSIS	Экспериментальные результаты (повторение 3 раза)			Средние экспериментальные результаты	Средняя погрешность, %
		первый	второй	третий		
$V = 30$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об и $d = 0,2$ мм						
CIR, мкм	4,03	4,94	3,91	3,84	4,23	4,73
CYL, мкм	10,51	11,53	11,96	10,68	11,39	7,73
R/O , мм	0,23	0,28	0,31	0,21	0,27	13,75
Ra , мкм	1,39	1,93	1,47	1,38	1,59	12,76
TL, мин	8,44	8,13	7,823	7,45	7,80	8,19
HRC	36,26	35,12	35,31	34,86	35,10	3,31
$V = 61$ м/мин, $f = 0,11$ мм/об и $d = 0,2$ мм						
CIR, мкм	3,80	3,13	3,98	3,16	3,42	11,00
CYL, мм	8,28	9,64	10,14	8,98	9,59	13,63
R/O , мм	0,16	0,15	0,19	0,2	0,18	11,11
Ra , мкм	1,07	1,26	1,33	1,16	1,25	14,40
TL, мин	3,69	3,08	3,23	3,63	3,31	11,37
HRC	38,03	36,07	35,16	35,08	35,44	7,32

Однако при сухой обработке ротационным инструментом с собственным приводом было отмечено лишь незначительное улучшение эксплуатационных характеристик по сравнению с режимом, где применялась гибридная наножидкость [11]. Учитывая эти данные, в исследовании указывается на потенциал для дальнейшего повышения эффективности обработки за счет использования микрогеометрированных (микротекстурированных) самоориентирующихся вращающихся инструментов в комбинации с различными наножидкостями в условиях MQL при одновременном контроле целостности обработанной поверхности.

Заключение

В работе выполнены исследование и оптимизация шероховатости поверхности, твердости подповерхностного слоя, стойкости инструмента и радиальных геометрических допусков (цилиндричность, круглость, радиальное биение) при точении жаропрочного сплава Inconel 718 ротационным инструментом с собственным приводом. Для решения поставленной много-

критериальной задачи использован гибридный подход, сочетающий генетический алгоритм (GA) и метод TOPSIS. Основные выводы работы заключаются в следующем.

1. Применение специально разработанного ротационного инструмента с собственным приводом в сочетании с гибридной наножидкостью $Al_2O_3 + \text{МУНТ}$ в условиях MQL (NFMQL) обеспечивает умеренное, но статистически значимое улучшение технологических показателей по сравнению с сухим точением, что объясняется синергетическим эффектом от вращения инструмента и повышенной эффективности теплоотвода и смазки.

2. Установлены ключевые факторы, влияющие на различные целевые функции: глубина резания (d) оказывает наиболее сильное влияние на параметры геометрической точности (GD&T), подача (f) является доминирующим фактором для шероховатости поверхности (Ra), а скорость резания (V) критически важна для стойкости инструмента (TL).

3. Разработаны эмпирические математические модели с высокими коэффициентами де-

терминации ($R^2 \approx 0,95$), адекватно описывающие влияние параметров на отклики и пригодные для целей прогнозирования и оптимизации.

4. Доминирующим механизмом отказа инструмента при обработке сплава Inconel 718 ротационным инструментом с собственным приводом является выкрашивание режущей кромки, вызванное термическими и механическими нагрузками, особенно в тяжелых режимах. Износ сопровождается пластической деформацией кромки и адгезией материала заготовки.

5. Морфология стружки чувствительна к режимам резания: повышение параметров приводит к образованию стружки с развитой зазубренной кромкой и поверхностными дефектами, в то время как при мягких режимах формируется стружка с относительно гладкой (полированной) поверхностью.

6. Результаты многоцелевой оптимизации (GA-TOPSIS) позволили определить оптимальные диапазоны режимов, обеспечивающие сбалансированное улучшение характеристик: $V = 30 \dots 60$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об, $d = 0,2$ мм. Прогнозируемые показатели для данного режима: отклонения от круглости и цилиндричности < 11 мкм, радиальное биение $< 0,23$ мм, $Ra = 1,07 \dots 1,39$ мкм, $TL = 3,46 \dots 8,44$ мин, твердость $36 \dots 38$ HRC.

7. Полученные результаты имеют практическую ценность для проектирования ротационного инструмента с собственным приводом и оптимизации технологических процессов обработки жаропрочных сплавов, таких как Inconel 718, способствуя повышению производительности и снижению затрат.

8. Перспективным направлением для дальнейших исследований является изучение возможности дополнительного повышения эффективности за счет применения микротекстурированного ротационного инструмента с собственным приводом в комбинации с различными наножиждкостями при обязательном контроле и обеспечении целостности обработанной поверхности.

Список литературы

1. *Rajurkar A., Chinchani S.* Investigations on homothetic and hybrid micro-textured tools during turning Inconel-718 // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2023. – Vol. 39 (4). – P. 529–545. – DOI: 10.1080/10426914.2023.2236188.

2. *Rajurkar A., Chinchani S.* Investigation on the effect of laser parameters and hatch patterns on the dimensional accuracy of micro-dimple and micro-channel texture geometries // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing.* – 2024. – Vol. 18. – P. 7021–7038. – DOI: 10.1007/s12008-023-01258-z.

3. *Kulkarni P., Chinchani S.* A review on machining of nickel-based superalloys using nanofluids under minimum quantity lubrication (NFMQL) // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C.* – 2023. – Vol. 104 (1). – P. 183–199. – DOI: 10.1007/s40032-022-00905-w.

4. *Shafiq A., Çolak A.B., Sindhu T.N.* Significance of EMHD graphene oxide (GO) water ethylene glycol nanofluid flow in a Darcy–Forchheimer medium by machine learning algorithm // *The European Physical Journal Plus.* – 2023. – Vol. 138 (3). – P. 213. – DOI: 10.1140/epjp/s13360-023-03798-5.

5. *Chinchani S., Kore S.S., Hujare P.* A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining // *Journal of Manufacturing Processes.* – 2021. – Vol. 68 (A). – P. 56–70. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.028.

6. Effect of nanoparticles in cutting fluid for structural machining of Inconel 718 / A. Faheem, T. Husain, F. Hasan, Q. Murtaza // *Advances in Materials and Processing Technologies.* – 2022. – Vol. 8 (1). – P. 259–276. – DOI: 10.1080/2374068X.2020.1802563.

7. *Kulkarni P., Chinchani S.* Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication // *Advances in Materials and Processing Technologies.* – 2024. – Vol. 11 (1). – P. 421–449. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

8. *Kulkarni P., Chinchani S.* Machining effects and multi-objective optimization in Inconel 718 turning with unitary and hybrid nanofluids under MQL // *Fracture and Structural Integrity.* – 2024. – Vol. 18 (68). – P. 222–241. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.15.

9. *Makhesana M.A., Patel K.M.* Performance assessment of vegetable oil-based nanofluid in Minimum Quantity Lubrication (MQL) during machining of Inconel 718 // *Advances in Materials and Processing Technologies.* – 2022. – Vol. 8 (3). – P. 3182–3198. – DOI: 10.1080/2374068X.2021.1945305.

10. On machining hardened steel AISI 4140 with self-propelled rotary tools: experimental investigation and analysis / W. Ahmed, H. Hegab, A. Mohany, H. Kishawy // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2021. – Vol. 113 (11–12). – P. 3163–3176. – DOI: 10.1007/s00170-021-06827-8.

11. *Chinchani S., Motgi N.* Machinability studies with radial GD&T parameters during turning Inconel 718 using a custom-designed self-propelled rotary tool: a GA-TOPSIS multi-objective optimisation approach //

Advances in Materials and Processing Technologies. – 2025. – P. 1–21. – DOI: 10.1080/2374068X.2025.2497768.

12. *Motgi N., Chinchani S.* A review on self-propelled rotary tools: a comparative with fixed-tool machining, modeling, design, and developments // *Advances in Manufacturing Engineering: Select proceedings of ICFAMMT 2024.* – Singapore: Springer, 2024. – P. 3–20. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering). – DOI: 10.1007/978-981-97-4324-7_1.

13. *Chinchani S., Motgi N.* Tool wear evaluation of self-propelled rotary tool and conventional round tool during turning Inconel 718 // *Fracture and Structural Integrity.* – 2024. – Vol. 18 (70). – P. 242–256. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.70.14.

14. *Li L., Kishawy H.A.* A model for cutting forces generated during machining with self-propelled rotary tools // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2006. – Vol. 46 (12–13). – P. 1388–1394. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.10.003.

15. *Emiroğlu U.* Experimental study on turning with self-propelled rotary cutting tool // *Journal of Thermal Engineering.* – 2017. – Vol. 3 (6). – P. 1553–1560.

16. High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multitasking lathe / H. Sasahara, A. Kato, H. Nakajima, H. Yamamoto, T. Muraki, M. Tsutsumi // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2008. – Vol. 48 (7–8). – P. 841–850. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.002.

17. *Kossakowska J., Jemielniak K.* Application of self-propelled rotary tools for turning of difficult-to-machine materials // *Procedia CIRP.* – 2012. – Vol. 1. – P. 425–430. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.076.

18. *Asokan P., Senthilkumar J.S.* Intelligent selection of machining parameters in turning of Inconel-718 using multi objective optimisation coupled with MADM // *International Journal of Machining and Machinability of Materials.* – 2010. – Vol. 8 (1–2). – P. 209–225. – DOI: 10.1504/IJMMM.2010.034497.

19. Multi-objective optimization of turning for nickel-based alloys using Taguchi-GRA and TOPSIS approaches / P. Mastan Rao, Ch. Deva Raj, S.H. Dhoria, M. Vijaya, J.R.R. Chowdary // *Journal of the Institution*

of Engineers (India): Series D. – 2024. – Vol. 105 (3). – P. 1473–1484. – DOI: 10.1007/s40033-023-00554-y.

20. Optimization of surface roughness, tool wear and material removal rate in turning of Inconel 718 with ceramic composite tools using MCDM methods based on Taguchi methodology / H. Boumaza, S. Belhadi, M.A. Yallese, K. Safi, A. Haddad // *Sādhanā.* – 2023. – Vol. 48 (1). – P. 1. – DOI: 10.1007/s12046-022-02060-5.

21. Machinability analysis and optimisation of process parameter in the turning of Inconel 718 alloy using multi criteria decision making method: A comparative study / O. Zhou, V. Sivalingam, K. Pandiyan, G. Kumar, J. Sun. – Springer Science and Business Media LLC, 2022. – P. 1–24. – DOI: 10.21203/rs.3.rs-1542507/v1.

22. Roles of new bio-based nanolubricants towards eco-friendly and improved machinability of Inconel 718 alloys / M.A. Ali, A.I. Azmi, M.N. Murad, M.Z. Zain, A.N. Khalil, N.A. Shuaib // *Tribology International.* – 2020. – Vol. 144. – P. 106106. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106106.

23. *Amrita M., Kamesh B.* Optimization of graphene based minimum quantity lubrication of Inconel 718 turning with multiple machining performances // *Materials Today: Proceedings.* – 2021. – Vol. 39 (4). – P. 1337–1344. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.568.

24. Effect of the physical properties of different vegetable oil-based nanofluids on MQLC grinding temperature of Ni-based alloy / B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, M. Yang, D. Jia, N. Zhang, Q. Wu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2017. – Vol. 89. – P. 3459–3474. – DOI: 10.1007/s00170-016-9324-7.

25. Prediction of damage factor in end milling of glass fibre reinforced plastic composites using artificial neural network / Ö. Erkan, B. Işık, A. Çiçek, F. Kara // *Applied Composite Materials.* – 2013. – Vol. 20. – P. 517–536. – DOI: 10.1007/s10443-012-9286-3.

26. *Sur G., Erkan Ö.* Surface quality optimization of CFRP plates drilled with standard and step drill bits using TAGUCHI, TOPSIS and AHP method // *Engineering Computations.* – 2021. – Vol. 38 (5). – P. 2163–2187. – DOI: 10.1108/EC-04-2020-0202.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 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



Turning Inconel 718 with a self-propelled rotary tool using a hybrid nanofluid under minimum quantity lubrication

Satish Chinchani^{1, a, *}, Nitin Motgi^{2, 3, b}

¹ Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, Affiliated to Savitribai Phule Pune University, Pune – 411037, India

² Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Information Technology, Affiliated to Savitribai Phule Pune University, Pune – 411048, India

³ Department of Mechanical Engineering, D.Y. Patil International University, Akurdi, Pune, Maharashtra, 411044, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchani@vit.edu; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9062-8341>,  nitin.221p0031@vit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 05 November 2025

Revised: 22 November 2025

Accepted: 17 December 2025

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Turning

Inconel 718

MQL

Rotary tool

Nanofluid

ABSTRACT

Introduction. Superalloys like nickel ones are crucial in aircraft construction, rocket production, and, more broadly, in the aviation industry due to their hard-wearing, and high-strength properties, but high machining temperatures pose challenges to their machinability. Manufacturers are always looking for new ways to improve these materials' machinability using cutting-edge cutting tool technologies and suitable cooling methods. In this context, rotary tools have shown significant potential for better performance in machining challenging materials. **The purpose of the work.** It is essential to comprehend geometric dimensioning and tolerance (*GD&T*) parameters when machining aerospace alloys to ensure precision and interchangeability in parts manufacturing. However, limited studies have investigated these parameters while considering the effect of nanofluids during turning with rotary tools. **Methods of investigation.** This study explores the turning of *Inconel 718* with a hybrid nanofluid under minimum quantity lubrication (*NFMQL*) conditions using a self-propelled rotary tool (*SPRT*). Nanofluids were prepared by mixing Al_2O_3 and multi-walled carbon nanotubes in palm oil. The analysis of worn tools was performed through optical and *SEM* images. Further, the radial *GD&T* parameters, such as circularity, cylindricity, radial runout, surface roughness, tool life, and workpiece hardness, are discussed as they vary with the cutting conditions. Additionally, the technique for order of preference by similarity to the ideal solution (*TOPSIS*) in association with a genetic algorithm (*GA*) was used to generate *Pareto* solutions and select the optimal compromise solution. The work with the optimized parameters is finally summarized. **Results and Discussion.** A hybrid nanofluid under *NFMQL* conditions was used to assess the processability of *Inconel 718* during turning with an *SPRT*. The circularity, cylindricity, radial runout, and machined surface characteristics were investigated. The worn tools have been examined through optical and scanning electron microscopy images. Surface roughness and tool life are significantly affected by feed and cutting speed, while cylindricity is strongly impacted by the depth of cut. *Pareto* fronts and the best compromise solutions were obtained using a genetic algorithm integrated with *TOPSIS*. This study found that turning *Inconel 718* at a feed rate and depth of cut of 0.1 mm/rev and 0.2 mm, respectively, and a cutting speed between 30–60 m/min could achieve circularity and cylindricity deviations of up to 5.68 μ m and radial runout of up to 0.43 mm, as well as surface roughness, tool life, and workpiece hardness in the ranges of 1.07–1.54 μ m, 3.46–8.44 min, and 36–38 HRC, respectively. This research provides valuable insights for designing an *SPRT* and promoting its wide adoption and application in the machining domain for machining superalloys. This study suggests exploring nanoparticle agglomeration in nanofluids and the use of additives to improve machining efficiency. Additionally, this research identifies opportunities to enhance machining performance under *NFMQL* conditions by utilizing micro-textured *SPRTs* with nanofluids, addressing concerns related to machined surface integrity.

For citation: Chinchani S., Motgi N. Turning Inconel 718 with a self-propelled rotary tool using a hybrid nanofluid under minimum quantity lubrication. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 152–175. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-152-175. (In Russian).

* Corresponding author

Satish Chinchani, Ph.D. (Engineering), Professor

Department of Mechanical Engineering,

Vishwakarma Institute of Information Technology,

Affiliated to Savitribai Phule Pune University, Pune – 411048, India

Tel.: 91-2026950401, e-mail: satish.chinchani@vit.edu

References

1. Rajurkar A., Chinchani S. Investigations on homothetic and hybrid micro-textured tools during turning Inconel-718. *Materials and Manufacturing Processes*, 2023, vol. 39 (4), pp. 529–545. DOI: 10.1080/10426914.2023.2236188.
2. Rajurkar A., Chinchani S. Investigation on the effect of laser parameters and hatch patterns on the dimensional accuracy of micro-dimple and micro-channel texture geometries. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024, vol. 18, pp. 7021–7038. DOI: 10.1007/s12008-023-01258-z.
3. Kulkarni P., Chinchani S. A review on machining of nickel-based superalloys using nanofluids under minimum quantity lubrication (NFMQL). *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2023, vol. 104 (1), pp. 183–199. DOI: 10.1007/s40032-022-00905-w.
4. Shafiq A., Çolak A.B., Sindhu T.N. Significance of EMHD graphene oxide (GO) water ethylene glycol nanofluid flow in a Darcy–Forchheimer medium by machine learning algorithm. *The European Physical Journal Plus*, 2023, vol. 138 (3), p. 213. DOI: 10.1140/epjp/s13360-023-03798-5.
5. Chinchani S., Kore S.S., Hujare P. A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68 (A), pp. 56–70. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.028.
6. Faheem A., Husain T., Hasan F., Murtaza Q. Effect of nanoparticles in cutting fluid for structural machining of Inconel 718. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 8 (1), pp. 259–276. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1802563.
7. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2024, vol. 11 (1), pp. 421–449. DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.
8. Kulkarni P., Chinchani S. Machining effects and multi-objective optimization in Inconel 718 turning with unitary and hybrid nanofluids under MQL. *Fracture and Structural Integrity*, 2024, vol. 18 (68), pp. 222–241. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.15.
9. Makhesana M.A., Patel K.M. Performance assessment of vegetable oil-based nanofluid in Minimum Quantity Lubrication (MQL) during machining of Inconel 718. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 8 (3), pp. 3182–3198. DOI: 10.1080/2374068X.2021.1945305.
10. Ahmed W., Hegab H., Mohany A., Kishawy H. On machining hardened steel AISI 4140 with self-propelled rotary tools: experimental investigation and analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 113 (11–12), pp. 3163–3176. DOI: 10.1007/s00170-021-06827-8.
11. Chinchani S., Motgi N. Machinability studies with radial GD&T parameters during turning Inconel 718 using a custom-designed self-propelled rotary tool: a GA-TOPSIS multi-objective optimisation approach. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2025, pp. 1–21. DOI: 10.1080/2374068X.2025.2497768.
12. Motgi N., Chinchani S. A review on self-propelled rotary tools: a comparative with fixed-tool machining, modeling, design, and developments. *Advances in Manufacturing Engineering: Select proceedings of ICFAMMT 2024*. Singapore, Springer, 2024, pp. 3–20. DOI: 10.1007/978-981-97-4324-7_1.
13. Chinchani S., Motgi N. Tool wear evaluation of self-propelled rotary tool and conventional round tool during turning Inconel 718. *Fracture and Structural Integrity*, 2024, vol. 18 (70), pp. 242–256. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.70.14.
14. Li L., Kishawy H.A. A model for cutting forces generated during machining with self-propelled rotary tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46 (12–13), pp. 1388–1394. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.10.003.
15. Emiroğlu U. Experimental study on turning with self-propelled rotary cutting tool. *Journal of Thermal Engineering*, 2017, vol. 3 (6), pp. 1553–1560.
16. Sasahara H., Kato A., Nakajima H., Yamamoto H., Muraki T., Tsutsumi M. High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multitasking lathe. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48 (7–8), pp. 841–850. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.002.
17. Kossakowska J., Jemielniak K. Application of self-propelled rotary tools for turning of difficult-to-machine materials. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 425–430. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.076.
18. Asokan P., Senthilkumaar J.S. Intelligent selection of machining parameters in turning of Inconel-718 using multi objective optimisation coupled with MADM. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2010, vol. 8 (1–2), pp. 209–225. DOI: 10.1504/IJMMM.2010.034497.

19. Mastan Rao P., Deva Raj C., Dhoria S.H., Vijaya M., Chowdary J.R.R. Multi-objective optimization of turning for nickel-based alloys using Taguchi-GRA and TOPSIS approaches. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2024, vol. 105 (3), pp. 1473–1484. DOI: 10.1007/s40033-023-00554-y.
20. Boumaza H., Belhadi S., Yallese M.A., Safi K., Haddad A. Optimization of surface roughness, tool wear and material removal rate in turning of Inconel 718 with ceramic composite tools using MCDM methods based on Taguchi methodology. *Sādhanā*, 2023, vol. 48 (1), p. 1. DOI: 10.1007/s12046-022-02060-5.
21. Zhou Q., Sivalingam V., Pandiyan K., Kumar G., Sun J. *Machinability analysis and optimisation of process parameter in the turning of Inconel 718 alloy using multi criteria decision making method: A comparative study*. Springer Science and Business Media LLC, 2022, pp. 1–24. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1542507/v1.
22. Ali M.A., Azmi A.I., Murad M.N., Zain M.Z., Khalil A.N., Shuaib N.A. Roles of new bio-based nanolubricants towards eco-friendly and improved machinability of Inconel 718 alloys. *Tribology International*, 2020, vol. 144, p. 106106. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106106.
23. Amrita M., Kamesh B. Optimization of graphene based minimum quantity lubrication of Inconel 718 turning with multiple machining performances. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 39 (4), pp. 1337–1344. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.568.
24. Li B., Li C., Zhang Y., Wang Y., Yang M., Jia D., Zhang N., Wu Q. Effect of the physical properties of different vegetable oil-based nanofluids on MQLC grinding temperature of Ni-based alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 89, pp. 3459–3474. DOI: 10.1007/s00170-016-9324-7.
25. Erkan Ö., Işık B., Çiçek A., Kara F. Prediction of damage factor in end milling of glass fibre reinforced plastic composites using artificial neural network. *Applied Composite Materials*, 2013, vol. 20, pp. 517–536. DOI: 10.1007/s10443-012-9286-3.
26. Sur G., Erkan Ö. Surface quality optimization of CFRP plates drilled with standard and step drill bits using TAGUCHI, TOPSIS and AHP method. *Engineering Computations*, 2021, vol. 38 (5), pp. 2163–2187. DOI: 10.1108/EC-04-2020-0202.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 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>).