



ANFIS-моделирование токарной обработки гибридных нанокомпозитов на основе алюминиевого сплава Al7075 при охлаждении сжатым воздухом

Сатиш Чинчаникар^{1, a, *}, Сухас Патил^{2, b}, Пареш Кулкарни^{3, c}

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. Патила, Акурди, Пуна, Махараштра, 411044, Индия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchanikar@vit.edu; ^b <https://orcid.org/0000-0002-2965-1531>, suhas.221p0007@viit.ac.in;

^c <https://orcid.org/0000-0002-2761-8754>, paresh2410@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.941.025:004.891.3:669.715:621.56

История статьи:

Поступила: 13 августа 2025

Рецензирование: 02 сентября 2025

Принята к печати: 09 сентября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Токарная обработка

Нанокомпозит Al7075

Охлаждение сжатым воздухом

ANFIS

Производительность обработки

АННОТАЦИЯ

Введение. Гибридные металломатричные композиты (HMMCs) находят все более широкое применение в авиационной и автомобильной промышленности благодаря их низкой плотности, высокой жесткости и исключительной удельной прочности. В частности, алюминиевые HMMCs, особенно на основе сплава Al7075, получают все большее признание. Непрерывные исследования и разработки в данной области направлены на поиск способов повышения долговечности и производительности этих передовых материалов. **Цель работы.** Обрабатываемость сплава Al7075 является серьезной проблемой из-за его абразивной армирующей фазы, которая вызывает быстрое изнашивание инструмента, увеличение сил резания и ухудшение качества обработанной поверхности. Кроме того, ориентация промышленности на экологически чистое производство привела к переходу от традиционной обработки с применением СОЖ к устойчивым альтернативам. Исходя из этого, исследователи оптимизируют производительность обработки, используя передовые технологические достижения и методы. Однако имеется ограниченное количество работ, посвященных моделированию производительности обработки нанокомпозитов на основе алюминиевого сплава Al7075 при токарной обработке в условиях охлаждения сжатым воздухом. **Методы исследования.** Разработка комплексной модели позволяет производителям лучше понимать, как повысить эффективность процессов токарной обработки нанокомпозитов на основе сплава Al7075. С этой целью в данной работе проводится моделирование производительности обработки гибридных нанокомпозитов на основе алюминиевого сплава Al7075 при течении в условиях охлаждения сжатым воздухом с использованием аддитивной сети на основе системы нечеткого вывода (ANFIS) для прогнозирования износа инструмента (TW), шероховатости поверхности (R_a) и силы резания (F_c) в зависимости от параметров процесса. **Результаты и обсуждение.** Разработана ANFIS-модель для прогнозирования производительности обработки с учетом влияния параметров процесса, таких как скорость резания, подача и глубина резания, для различных нанокомпозитов на основе алюминиевого сплава Al7075, которые были изготовлены методом механического замешивания частиц в расплав с использованием наночастиц карбида кремния (30...50 нм) и графена (5...10 нм) в качестве армирующих элементов. Армирующие материалы влияют на механические и физические свойства композитов. Для инженерных приложений SiC и графен являются предпочтительными армирующими элементами, обладающими отличительными характеристиками. ANFIS-модели были разработаны для прогнозирования R_a , F_c и TW на основе экспериментальных результатов. Метод Сугено был выбран для представления нечетких правил и функций принадлежности, поскольку он использует взвешенные средние значения в процессе дефазификации и обеспечивает лучшую эффективность обработки. Инструментарий MATLAB ANFIS применялся для разработки и настройки нечетких систем вывода. Разработанная ANFIS-модель эффективно прогнозирует характеристики обработки, предлагая практический подход к оптимизации параметров процесса с высокой надежностью. Исследование продемонстрировало хорошее соответствие между экспериментальными результатами и прогнозируемыми ANFIS-результатами, при этом средняя ошибка прогнозирования составила менее 8 %. В частности, ANFIS-модель дала ошибки в 5,1 % для R_a , 13,45 % для F_c и 7,92 % для TW . Модель продемонстрировала отличное соответствие экспериментальным данным, демонстрируя высокую точность прогнозирования и возможность обобщения. Для лучшего понимания влияния параметров процесса на F_c , R_a и TW для различных нанокомпозитов построены 3D-графики. Полученные результаты подтверждают эффективность охлаждения сжатым воздухом для улучшения обрабатываемости при минимизации воздействия на окружающую среду. Кроме того, разработанная ANFIS-модель служит надежным инструментом для оптимизации параметров токарной обработки композитов на основе алюминиевого сплава Al7075, поддерживая развитие стратегий экологически чистого производства.

Для цитирования: Чинчаникар С., Патил С., Кулкарни П. ANFIS-моделирование токарной обработки гибридных нанокомпозитов на основе алюминиевого сплава Al7075 при охлаждении сжатым воздухом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 48–61. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-48-61.

*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.chinchanikar@viit.ac.in

Введение

Гибридные металломатричные композиты (HMMCs) находят все более широкое применение в авиастроении и автомобильной промышленности благодаря уникальному сочетанию свойств, включающему в себя низкую плотность, повышенную жесткость, высокую удельную прочность и низкий коэффициент теплового расширения. Возрастающая потребность в передовых конструкционных материалах для авиационной, автомобильной и оборонной отраслей стимулирует активное внедрение алюминиевых металломатричных композитов (MMCs), особенно на основе сплава Al7075, характеризующегося высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью [1].

Несмотря на преимущества, обрабатываемость сплава Al7075 остается серьезной проблемой, обусловленной наличием абразивных упрочняющих фаз, которые вызывают интенсивный износ режущего инструмента, увеличение сил резания и ухудшение качества обработанной поверхности. В контексте растущего внимания к экологически безопасному производству традиционные методы обработки с обильным применением смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) все чаще заменяются устойчивыми альтернативными технологиями. Одним из перспективных решений является охлаждение сжатым воздухом, которое не только снижает негативное воздействие на окружающую среду, но и способствует эффективному удалению стружки и интенсификации локального охлаждения в зоне резания.

Ввиду нелинейного и многофакторного характера процесса точения в условиях охлаждения сжатым воздухом широкое распространение получили методы интеллектуального моделирования. Традиционное жидкостное охлаждение подразумевает использование СОЖ на основе минеральных масел, что сопряжено с экологическими рисками, негативным воздействием на здоровье персонала и высокими затратами на утилизацию. Альтернативные подходы, включающие в себя минимальное количество смазки (MQL), применение наножидкостей и сжатого воздуха, а также криогенное охлаждение, приобретают все большую актуальность в машиностроении, поскольку позволяют одновремен-

но решать задачи экологической безопасности и улучшения обрабатываемости, снижения износа инструмента, уменьшения сил резания и повышения качества поверхности [2, 3].

Исследования показывают, что применение MQL с охлажденной жидкостью (до -20°C) при точении сплава Al7075 позволяет существенно улучшить качество поверхности и снизить силы резания по сравнению с другими условиями обработки [4]. Установлено, что радиус вершины режущего инструмента оказывает существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности. В последние годы при разработке технологических процессов широко использовались эмпирические данные, полученные в предшествующих исследованиях. Внедрение современных методов обработки и научно обоснованных подходов, таких как методы искусственного интеллекта (AI), позволяет значительно расширить технологические возможности. Для достижения оптимальных результатов обработки необходимы точные методы моделирования. В частности, методы мягких вычислений, основанные на нечетких правилах и обладающие способностью к самообучению и адаптации, находят широкое применение в задачах моделирования [5].

Анализ научной литературы показывает, что искусственная нейронечеткая система вывода (ANFIS) демонстрирует превосходящие результаты по сравнению с другими вычислительными методами при оценке характеристик обработки [6, 7]. Ряд исследований указывает на то, что генетическое программирование (GEP) в определенных задачах превосходит искусственные нейронные сети (ANN), в то время как в других случаях ANFIS дает более точные прогнозы. Установлено также, что ANN и ANFIS могут обеспечивать более высокую точность, чем методы планирования эксперимента (RSM) [8–12]. Оптимизация технологических параметров является ключевым фактором повышения качества поверхности и совершенствования процессов обработки [13]. Генетические алгоритмы (GA) применялись для оптимизации параметров фрезерования сплава Al7075-T6, при этом была подтверждена адекватность математических моделей для прогнозирования силы резания [14]. В ряде работ искусственные нейронные сети (ANN) использовались для прогнозирования трибологических свойств композитов Al7075-

Al_2O_3 , при этом наблюдалось хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными [15].

Исследования применения наножидкостей при минимальной подаче смазки (NFMQL) для повышения эффективности обработки резанием представлены в работах [16, 17]. В большинстве исследований для моделирования производительности обработки использовалась ANFIS, что обусловлено ее эффективностью в аппроксимации сложных нелинейных зависимостей между параметрами процесса [18–21]. Тем не менее работ, посвященных изучению влияния концентрации наночастиц в матрице Al7075 на характеристики обработки, крайне мало. В частности, отсутствует информация об ANFIS-моделировании точения гибридных нанокомпозитов на основе сплава Al7075 с применением охлаждения сжатым воздухом. В связи с этим в настоящей работе предпринята попытка ANFIS-моделирования процесса обработки гибридных нанокомпозитов Al7075 с целью установления взаимосвязи между концентрацией нанодисперсных частиц в матрице Al7075 и производительностью обработки в зависимости от режимов резания.

Для достижения поставленной цели было изготовлено девять различных нанокомпозитов на основе сплава Al7075 с варьируемым содержанием карбида кремния (SiC) и графена. Для каждого композиционного материала проведено девять экспериментов по точению в условиях охлаждения сжатым воздухом. На основе полученных данных разработана ANFIS-модель для прогнозирования силы резания, износа по задней поверхности инструмента и шероховатости обработанной поверхности с учетом режимов резания и состава нанокомпозита. Проведена серия дополнительных экспериментов для верификации результатов моделирования ANFIS.

Методы

В данном разделе представлена структура эксперимента по построению ANFIS-моделей, предназначенных для прогнозирования шероховатости поверхности (R_a), силы резания (F_c) и износа инструмента (TW) при точении композиционного материала на основе сплава Al7075. Подробно описаны схема экспериментальной

установки и условия проведения токарной обработки, а также методология разработки ANFIS-моделей.

В качестве материала для экспериментов использовали образцы из сплава Al7075 в форме цилиндрических прутков (300×30 мм), которые подвергались точению с применением твердосплавного режущего инструмента CNMG120408MS, закрепленного в державке PCBNR2525M12 (ISO). Все эксперименты проводились на прецизионном токарном станке с ЧПУ, что обеспечивало стабильность геометрии и положения инструмента в процессе обработки. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Химический состав сплава Al7075 приведен на рис. 2. Описание характеристик различных композиционных материалов, полученных методом механического перемешивания компонентов в расплаве, представлено в табл. 1.

Выбор диапазонов варьирования входных параметров (режимов резания) основывался на результатах анализа данных из научной литературы, предварительных экспериментов, технических характеристиках используемого оборудования и рекомендациях производителя режущего инструмента. Оптимизированные диапазоны параметров обеспечивали повышение производительности обработки и увеличение стойкости инструмента. Общее количество экспериментов составило 81, при этом исследовались девять различных композиционных материалов (рис. 3).

Варьировались следующие параметры: скорость резания V в диапазоне 100...200 м/мин, подача $f = 0,1...0,3$ мм/об и глубина резания $d = 0,2...0,8$ мм. Для каждого режима точения определяли значения R_a , F_c и TW . Силу резания F_c измеряли с помощью предварительно откалиброванного динамометра. Износ задней поверхности инструмента TW оценивали после каждого прохода с использованием цифрового микроскопа Dino-Lite. Шероховатость поверхности R_a измеряли с помощью профилометра. Контроль износа инструмента осуществлялся в соответствии с требованиями стандарта ISO 3685-1977(E). Критериями предельного состояния инструмента являлись достижение величины износа по задней поверхности 0,2 мм или внезапный скол режущей кромки.

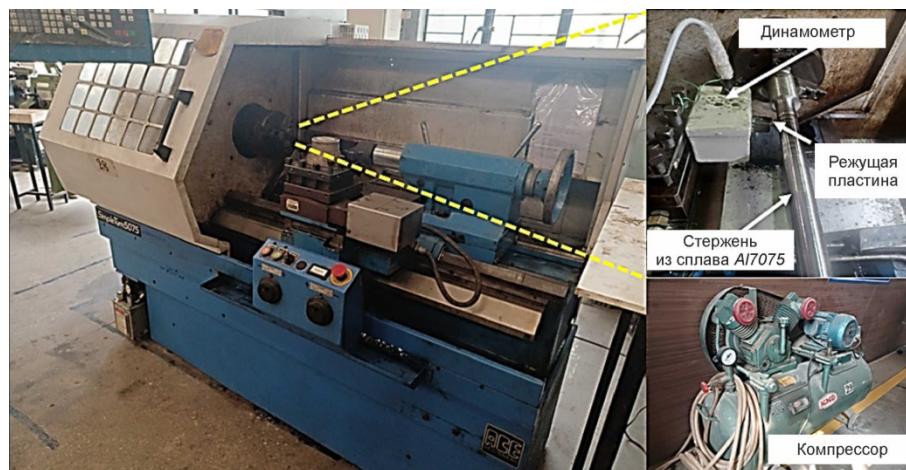


Рис. 1. Внешний вид токарной установки

Fig. 1. Appearance and components of the lathe setup

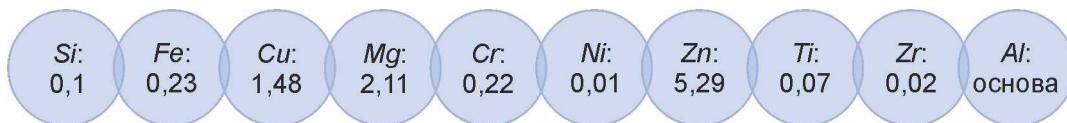


Рис. 2. Химический состав сплава Al7075

Fig. 2. Elemental composition of Al7075 alloy

Таблица 1

Table 1

Нанокомпозиты на основе алюминиевого сплава Al7075 с различным армированием

Al7075 aluminum alloy nanocomposites with different types of reinforcement

Образец / Specimen	Типы армирования / types of reinforcement
S1	Неупрочненный сплав Al7075 / Unreinforced Al7075
S2	Al7075 + 0,5 % SiC + 0,1 % графен / Al7075 + 0.5 % SiC + 0.1 % graphene
S3	Al7075 + 0,5 % SiC + 0,2 % графен / Al7075 + 0.5 % SiC + 0.2 % graphene
S4	Al7075 + 0,5 % SiC + 0,3 % графен / Al7075 + 0.5 % SiC + 0.3 % graphene
S5	Al7075 + 0,5 % графен + 1 % SiC / Al7075 + 0.5 % graphene + 1 % SiC
S6	Al7075 + 0,5 % графен + 2 % SiC / Al7075 + 0.5 % graphene + 2 % SiC
S7	Al7075 + 0,5 % графен + 3 % SiC / Al7075 + 0.5 % graphene + 3 % SiC
S8	Al7075 + 1 % графен + 2 % SiC / Al7075 + 1 % graphene + 2 % SiC
S9	Al7075 + 1 % графен + 4 % SiC / Al7075 + 1 % graphene + 4 % SiC



Рис. 3. Девять образцов различных композиционных материалов

Fig. 3. Nine samples of various composite materials

Искусственная нейронечеткая система вывода (ANFIS)

Искусственная нейронечеткая система вывода (ANFIS) представляет собой эффективный инструмент для моделирования сложных систем, характеризующихся неопределенностью и нечеткостью исходной информации. ANFIS сочетает в себе логический аппарат нечеткого вывода и способность нейронных сетей к обучению, что позволяет создавать прозрачные и интерпретируемые модели. В основе ANFIS лежит адаптивная сеть, осуществляющая отображение входных переменных в выходные посредством применения механизмов нечеткого вывода и алгоритмов нейросетевого обучения. Типовая архитектура ANFIS включает в себя пять последовательных слоев, состоящих из взаимосвязанных узлов (рис. 4) [8]. Передача входных данных осуществляется последовательно через все слои сети, при этом каждый слой выполняет определенную функцию в рамках общего механизма нечеткого вывода.

Функцией первого слоя, или слоя фазификации, является преобразование четких значений входных переменных в нечеткие значения (степени принадлежности) посредством применения функций принадлежности. Второй слой, называемый производственным, осуществляет расчет степени активации каждого правила путем умножения соответствующих значений функций принадлежности. Назначением нормализующего слоя является преобразование степеней активации правил в относительные значения посредством деления каждого значения на их сумму, что обеспечивает нормировку вкладов правил. Четвертый слой, или слой дефазификации, выполняет преобразование нормализованных значений степеней активации в выходные переменные для каждого правила посредством применения линейных функций. Заключительный, выходной слой осуществляют агрегирование результатов, полученных на основе отдельных правил, для формирования единого четкого значения выходной переменной, представляющего собой окончательное решение системы.

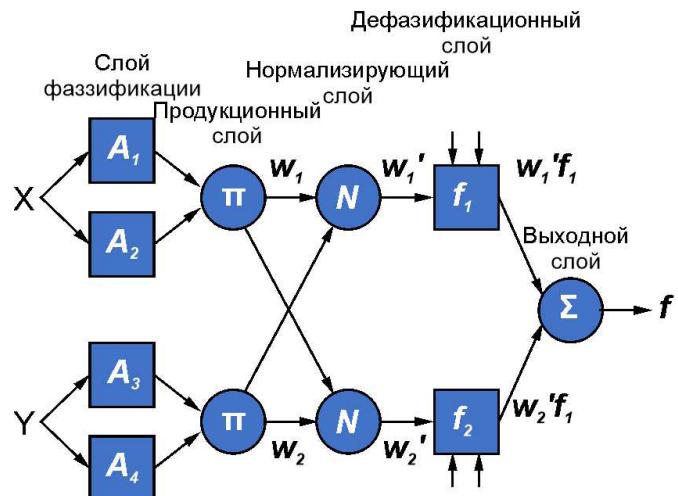


Рис. 4. Общая структура ANFIS

Fig. 4. General structure of ANFIS

мализующего слоя является преобразование степеней активации правил в относительные значения посредством деления каждого значения на их сумму, что обеспечивает нормировку вкладов правил. Четвертый слой, или слой дефазификации, выполняет преобразование нормализованных значений степеней активации в выходные переменные для каждого правила посредством применения линейных функций. Заключительный, выходной слой осуществляют агрегирование результатов, полученных на основе отдельных правил, для формирования единого четкого значения выходной переменной, представляющего собой окончательное решение системы.

Результаты и их обсуждение

В настоящем разделе представлено ANFIS-моделирование процесса точения нанокомпозитов на основе сплава Al7075 в условиях охлаждения сжатым воздухом. Рассмотрено влияние режимов резания и состава композиционных материалов на основе Al7075 на характеристики процесса. Исходя из полученных экспериментальных данных построены ANFIS-модели для прогнозирования шероховатости поверхности R_a , силы резания F_c и износа инструмента TW . Адекватность представления процесса принятия решений системой ANFIS обеспечивается применением нечетких правил и функций принадлежности, при этом повышение точности моделирования достигается за счет использования экспериментальных данных.

Метод Сугено упрощает реализацию ANFIS-моделей и повышает эффективность вычислений, поскольку в процессе дефазификации используются взвешенные средние значения. Важным преимуществом метода Сугено является возможность представления нелинейных систем в виде совокупности линейных уравнений. Пакет MATLAB предоставляет широкие возможности для реализации ANFIS-моделей. Инструментарий MATLAB ANFIS обеспечивает удобный интерфейс для разработки и настройки систем нечеткого вывода, который может быть использован исследователями и специалистами, работающими в области нечеткой логики и искусственного интеллекта.

На рис. 5 представлена блок-схема алгоритма построения ANFIS-модели в MATLAB. Модели для каждого отклика исследуются независимо, поскольку ANFIS оперирует только с одним выходным значением одновременно. Для прогнозирования R_a , F_c и TW были разработаны три отдельные ANFIS-модели, в которых в качестве входных переменных использовались скорость резания V , подача f и глубина резания d . Начальным этапом построения ANFIS-модели является

определение входных и выходных переменных, диапазонов их варьирования и подготовка соответствующих экспериментальных данных для обучения и тестирования модели.

Генерация FIS осуществлялась с использованием метода разбиения сетки, реализованного в инструментарии ANFIS MATLAB. Применение данного метода позволяет упростить базу правил и улучшить интерпретируемость FIS-модели. На следующем этапе формировались треугольные функции принадлежности. В настоящей работе в качестве выходных функций принадлежности использовались константы. Для точной настройки параметров FIS, включая функции принадлежности и веса правил, применялся алгоритм гибридной оптимизации, при этом общее количество эпох обучения составляло 10. Гиперпараметры, выбранные для создания ANFIS-моделей для прогнозирования R_a , F_c и TW , представлены на рис. 6.

Обучение FIS завершалось после достижения целевого количества эпох и определения минимального значения среднеквадратичной ошибки ($RMSE$) разработанной модели. Значения $RMSE$ для ANFIS-моделей, предназначенных для прогнозирования R_a , F_c и TW , при использовании



Рис. 5. Этапы ANFIS-моделирования

Fig. 5. Stages of ANFIS modeling

Функции принадлежности (Mfs): Треугольные (trimf)	Выходные функции принадлежности: Константа	Система нечеткого вывода (F/S): Модель Такаги – Сугено
Количество узлов: 193	Количество линейных параметров: 81	Количество нелинейных параметров: 36
Количество обучающих данных: 81	Количество нечетких правил: 81	Количество эпох: 10 и вес правил: 1

Рис. 6. Параметры ANFIS-модели

Fig. 6. ANFIS model parameters

трехугольных функций принадлежности (MF) составили 1,56637, 1,56637 и 3,31021 соответственно. В данном исследовании база состояла из 81 нечеткого правила. Структура разработанных ANFIS-моделей для прогнозирования Ra , F_c и TW представлена на рис. 7.

После завершения процесса обучения проводилось тестирование разработанных моделей. Оценивались ошибки, полученные при обработке данных обучения и тестирования. Для установления связи между данными и результатами прогнозирования использовались трехугольные функции принадлежности (рис. 8). Установлено, что ошибки обучения и тестирования составили 0,057101 и 0,085732 для шероховатости поверхности, 1,55 и 0,818 для силы резания и 3,31021 и 4,15 для износа инструмента соответственно.

Для визуализации влияния режимов резания на характеристики процесса были построены поверхностные графики зависимостей Ra , F_c и TW от двух параметров при фиксированном значении третьего параметра ($V_c = 150$ м/мин, $f = 0,2$ мм/об и $d = 0,5$ мм). Полученные графические зависимости (рис. 9–11) облегчают анализ и интерпретацию результатов моделирования.

Анализ графиков, представленных на рис. 9–11, показывает, что для достижения минимальной

шероховатости поверхности Ra рекомендуется использовать более высокую скорость резания V в сочетании с умеренными или низкими значениями подачи f и глубины резания d . Снижение силы резания F_c достигается при высокой скорости резания V и низких значениях подачи f и глубины резания d . Аналогично для минимизации износа инструмента TW рекомендуется использовать повышенные значения скорости резания V при умеренных значениях подачи f и глубины резания d .

С целью верификации адекватности разработанных ANFIS-моделей были проведены дополнительные эксперименты по точению на режимах резания, не задействованных при обучении моделей. В табл. 2 представлено сопоставление экспериментально измеренных значений выходных параметров с результатами прогнозирования, полученными с использованием ANFIS. Проведение данного эксперимента позволило выполнить комплексную оценку прогностической способности разработанных моделей в расширенном диапазоне входных переменных. Для минимизации влияния случайных факторов в табл. 2 представлены усредненные значения Ra , F_c и TW , полученные по результатам трех параллельных испытаний инструмента.

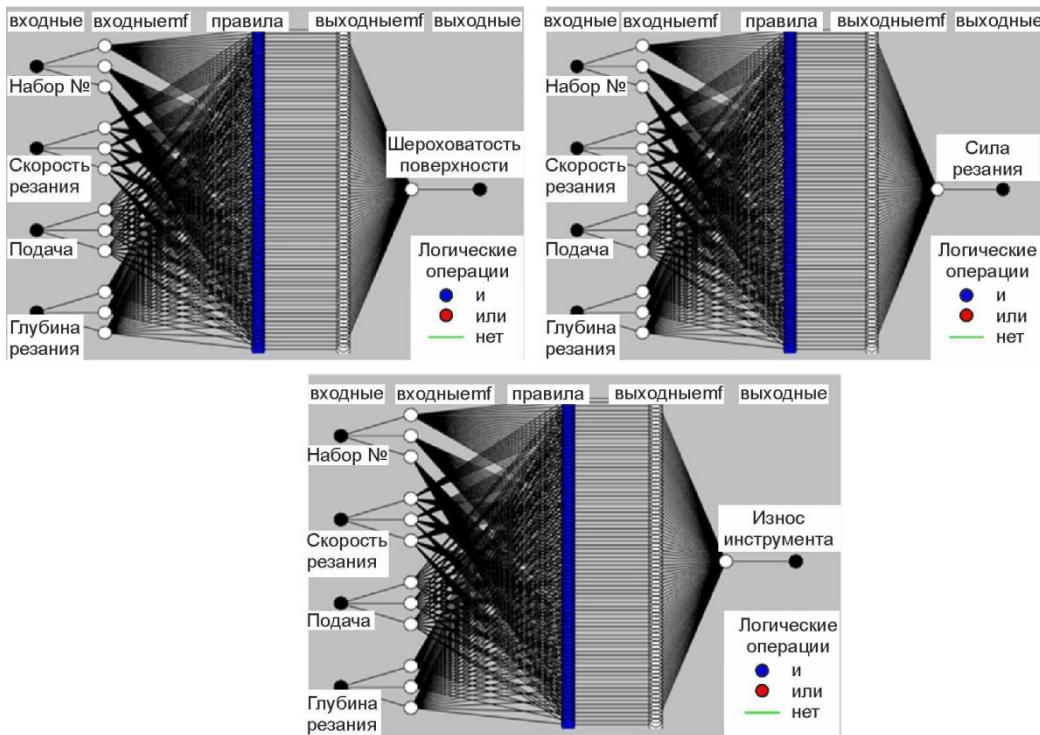


Рис. 7. Разработанная структура ANFIS-модели

Fig. 7. Developed ANFIS model structure

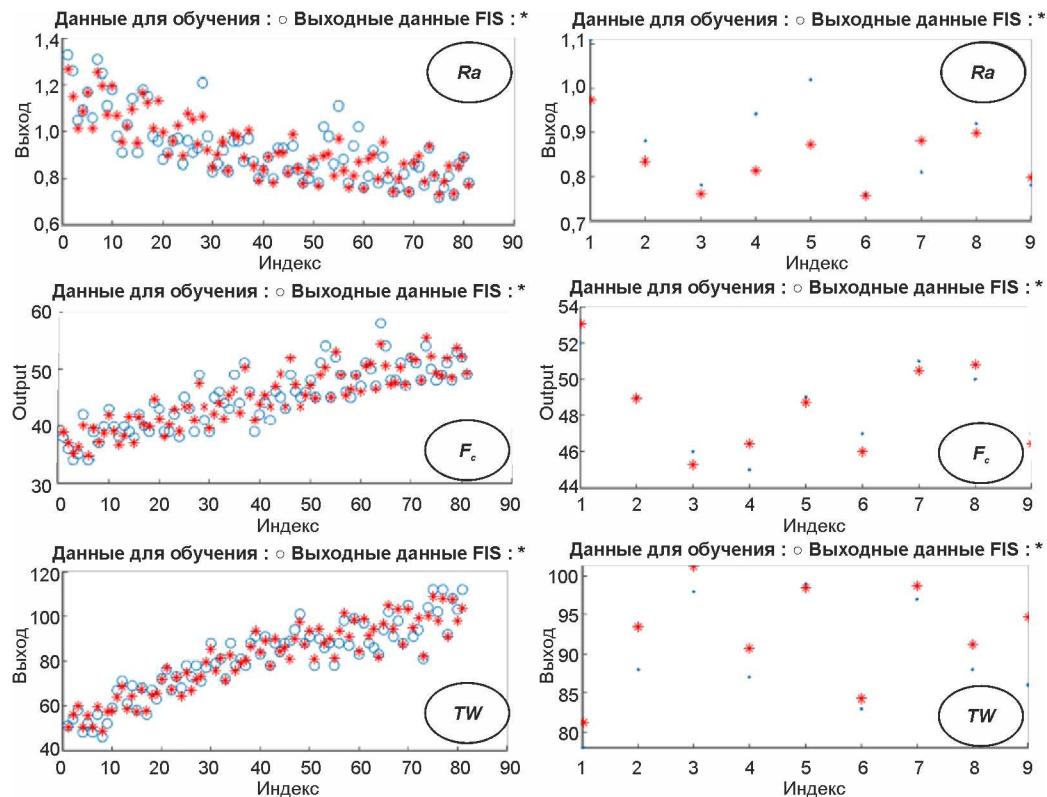


Рис. 8. Карттирование тестовых и обучающих данных с использованием выходных данных FIS

Fig. 8. Mapping test and training data using FIS output

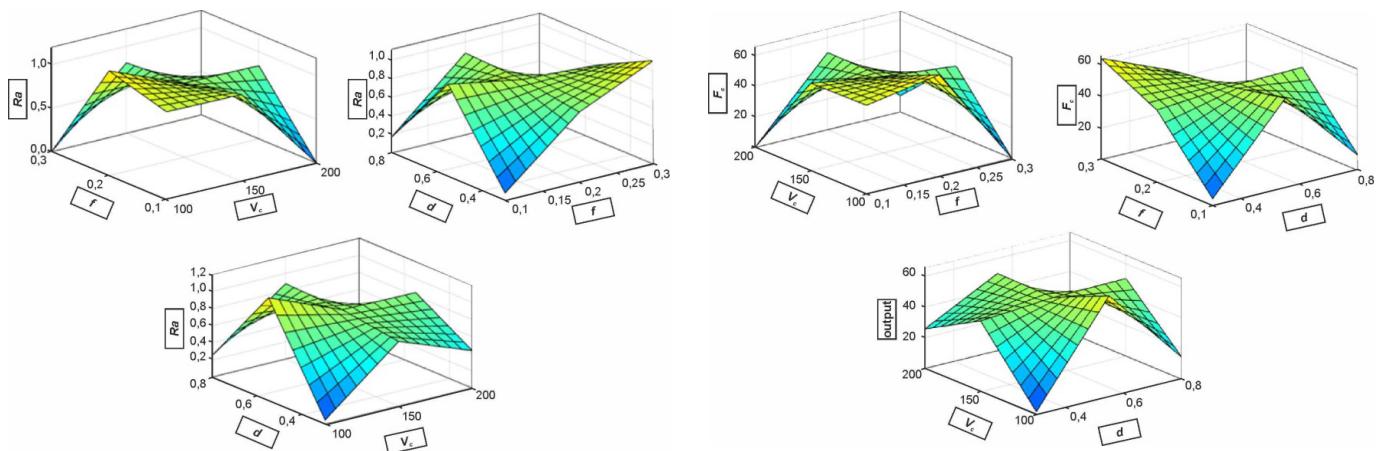


Рис. 9. Зависимость Ra от параметров процесса

Fig. 9. Dependence of Ra on process parameters

Результаты анализа свидетельствуют о высокой прогностической точности ANFIS-моделей, которые характеризуются средней погрешностью, не превышающей 8 % для всех исследованных параметров (Ra , F_c и TW), что подтверждается хорошим соответствием расчетных и экспериментальных данных. В частности, погрешность прогнозирования износа

инструмента составила 7,92 %, силы резания – 13,45 %, а шероховатости поверхности – 5,1 %. Полученные результаты подтверждают перспективность использования ANFIS в качестве эффективного и надежного инструмента для прогнозирования характеристик процесса точения металломатричных композитов на основе сплава Al7075.

Рис. 10. Зависимость F_c от параметров процесса

Fig. 10. Dependence of F_c on process parameters

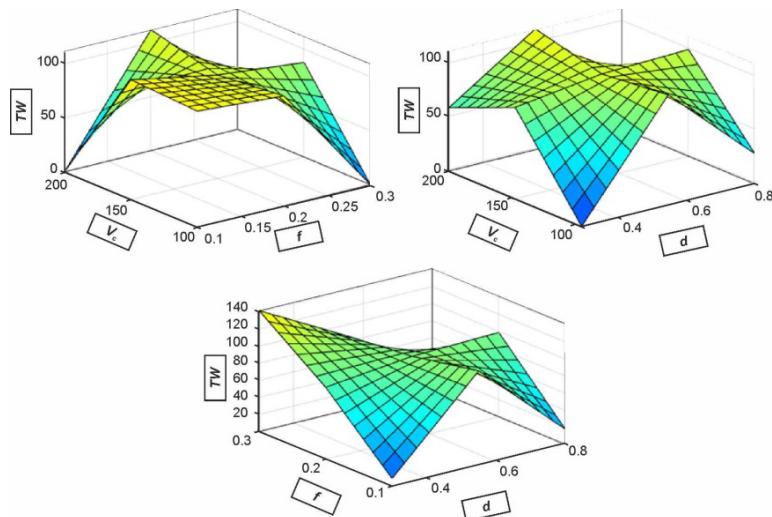
Рис. 11. Зависимость TW от параметров процессаFig. 11. Dependence of TW on process parameters

Таблица 2

Table 2

Эксперименты для проверки достоверности (модели)

Validation experiments

V (m/min), f (mm/rev), d (mm)	Ra (μm)		F_c (N)		TW (μm)	
	Expt.	ANFIS	Expt.	ANFIS	Expt.	ANFIS
110; 0,12; 0,4	0,854	0,843	51,39	55,7	83,47	87,5
130; 0,17; 0,45	0,875	0,835	55,92	63,1	86,19	91,7
165; 0,23; 0,65	0,836	0,841	58,38	49,7	94,88	103,7
180; 0,27; 0,75	0,812	0,896	48,33	57,7	112,32	122,7
200; 0,15; 0,35	0,701	0,759	39,89	44,6	94,95	104,3

Заключение

В настоящей работе представлено моделирование процесса точения нанокомпозитов на основе сплава Al7075 в условиях охлаждения сжатым воздухом с применением ANFIS. На основании проведенных исследований сформулированы следующие выводы.

1. Результаты работы подтверждают, что применение охлаждения сжатым воздухом является эффективной и экологически безопасной альтернативой традиционным методам жидкостного охлаждения, при этом обеспечивается повышение производительности точения нанокомпозитов на основе сплава Al7075.

2. Разработанная ANFIS-модель обеспечивает эффективное прогнозирование характеристик процесса, что открывает возможности для оптимизации режимов резания с высокой степенью надежности.

3. Установлено хорошее соответствие между экспериментальными данными и результатами

моделирования с использованием ANFIS, при этом средняя ошибка прогнозирования не превышала 9 %. В частности, погрешность прогнозирования шероховатости поверхности составила 5,1 %, силы резания – 13,45 %, а износа инструмента – 7,92 %. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования ANFIS в качестве эффективного инструмента для прогнозирования характеристик процесса точения металломатричных композитов на основе сплава Al7075.

4. Предложенный подход, сочетающий устойчивое охлаждение и интеллектуальное предиктивное моделирование, представляет собой важный шаг на пути к внедрению экологически безопасных технологий обработки металломатричных композитов.

5. Результаты проведенных исследований демонстрируют значительное влияние процентного содержания армирующего элемента, дисперсности частиц и качества их распределения

в матрице на механические свойства гибридных нанокомпозитов на основе сплава Al7075, что представляет ценность для разработки перспективных промышленных технологий.

Список литературы

1. Boron nitride nanotubes induced strengthening in aluminium 7075 composite via cryomilling and spark plasma sintering / S.M.A.K. Mohammed, A. Nisar, D. John, A.K. Sukumaran, Y. Fu, T. Paul, A.F. Hernandez, S. Seal, A. Agarwal // Advanced Composites and Hybrid Materials. – 2025. – Vol. 8 (1). – Art. 155. – DOI: 10.1007/s42114-024-01173-1.
2. Devitte C., Souza A.J., Amorim H.J. Impact of cooled compressed air and high-speed cutting on the drilling of hybrid composite-metal stacks // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 125 (11). – P. 5445–5461. – DOI: 10.1007/s00170-023-11083-z.
3. Kulkarni P., Chinchanikar S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2025. – Vol. 11 (1). – P. 421–449. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.
4. Bagheri A., Abedini V., Hajialimohamadi A. Impact of machining parameters on surface roughness and machining forces in Al7075 turning with minimum quantity lubrication and cold fluid // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2025. – DOI: 10.1177/09544089241308052.
5. Kulkarni P., Chinchanikar S. Modelling turning performance of Inconel 718 with hybrid nanofluid under MQL using ANN and ANFIS // Fracture and Structural Integrity. – 2024. – Vol. 18 (70). – P. 71–90. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.70.04.
6. Prabhu S., Vinayagam B.K. Adaptive neuro fuzzy inference system modelling of multi-objective optimisation of electrical discharge machining process using single-wall carbon nanotubes // Australian Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 13 (2). – P. 97–117. – DOI: 10.7158/M13-074.2015.13.2.
7. Sharma D., Bhowmick A., Goyal A. Enhancing EDM performance characteristics of Inconel 625 superalloy using response surface methodology and ANFIS integrated approach // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2022. – Vol. 37. – P. 155–173. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.01.005.
8. Hewidy M., Salem O. Integrating experimental modelling techniques with the Pareto search algorithm for multiobjective optimization in the WEDM of Inconel 718 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 129 (1–2). – P. 299–319. – DOI: 10.1007/s00170-023-12200-8.
9. GEP-and ANN-based tool wear monitoring: a virtually sensing predictive platform for MQL-assisted milling of Inconel 690 / B. Sen, M. Mia, U.K. Mandal, S.P. Mondal // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105. – P. 395–410. – DOI: 10.1007/s00170-019-04187-y.
10. Kumar A., Pradhan M.K. An ANFIS modelling and genetic algorithm-based optimization of through-hole electrical discharge drilling of Inconel-825 alloy // Journal of Materials Research. – 2023. – Vol. 38 (2). – P. 312–327. – DOI: 10.1557/s43578-022-00728-6.
11. Premnath A.A., Alwarsamy T., Sugapriya K. A comparative analysis of tool wear prediction using response surface methodology and artificial neural networks // Australian Journal of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 12 (1). – P. 38–48. – DOI: 10.7158/M12-075.2014.12.1.
12. Babu K.N., Karthikeyan R., Punitha A. An integrated ANN-PSO approach to optimize the material removal rate and surface roughness of wire cut EDM on INCONEL 750 // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19. – P. 501–505. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.643.
13. Optimising subsurface integrity and surface quality in mild steel turning: A multi-objective approach to tool wear and machining parameters / M. Imran, S. Shuangfu, B. Yuzhu, W. Yuming, N. Raheel // Journal of Materials Research and Technology. – 2025. – Vol. 35. – P. 3440–3462. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.01.246.
14. Optimization of cutting parameters for cutting force in shoulder milling of Al7075-T6 using response surface methodology and genetic algorithm / M. Subramanian, M. Sakthivel, K. Sooryaprakash, R. Sudhakaran // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 64. – P. 690–700. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.09.144.
15. A study on the Al_2O_3 reinforced Al7075 metal matrix composites wear behavior using artificial neural networks / R. Pramod, G.V. Kumar, P.S. Gouda, A.T. Mathew // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5 (5). – P. 11376–11385. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.105.
16. Kulkarni P., Chinchanikar S. Cutting force modeling during turning Inconel 718 using unitary Al_2O_3 and hybrid MWCNT + Al_2O_3 nanofluids under minimum quantity lubrication // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). – 2025. – Vol. 19 (7). – P. 5185–5202. – DOI: 10.1007/s12008-024-02120-6.
17. Chinchanikar S., Kulkarni P. 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.
18. Zare Chavoshi S. Tool flank wear prediction in CNC turning of 7075 AL alloy SiC composite //

Production Engineering. – 2011. – Vol. 5 (1). – P. 37–47. – DOI: 10.1007/s11740-010-0282-x.

19. Surface roughness accuracy prediction in turning of Al7075 by adaptive neuro-fuzzy inference system / B. Veluchamy, N. Karthikeyan, B.R. Krishnan, C.M. Sundaram // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 37. – P. 1356–1358. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.560.

20. The prediction of surface roughness and tool vibration by using metaheuristic-based ANFIS during dry turning of Al alloy (AA6013) / M.A. Guvenc, H.H. Bilgic,

M. Cakir, S. Mistikoglu // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2022. – Vol. 44 (10). – P. 474. – DOI: 10.1007/s40430-022-03798-z.

21. Experimental investigation of turning Al 7075 using Al_2O_3 nano-cutting fluid: ANOVA and TOPSIS approach / H. Ramakrishnan, R. Balasundaram, P. Selvaganapathy, M. Santhakumari, P. Sivasankaran, P. Vignesh // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1 (12). – P. 1639. – DOI: 10.1007/s42452-019-1664-0.

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



ANFIS modeling of turning Al7075 hybrid nanocomposites under compressed air cooling

Satish Chinchanikar^{1, a,*}, Suhas Patil^{2, b}, Paresh Kulkarni^{3, c}

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.chinchanikar@vit.edu; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2965-1531>,  suhas.221p0007@viit.ac.in;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-2761-8754>,  paresh2410@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 August 2025

Revised: 02 September 2025

Accepted: 09 September 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Turning

Al7075 nanocomposite

Compressed air cooling

ANFIS

Machining performance

ABSTRACT

Introduction. Hybrid metal matrix composites (HMMCs) are increasingly used in the aviation and automotive industries due to their low density, high stiffness, and exceptional specific strength. Among aluminum MMCs, Al7075-based composites are gaining wider acceptance. Continuous research and development in this field focuses on improving the durability and performance of these advanced materials. **Purpose of the work.** Machinability of Al7075 is a significant challenge because the abrasive reinforcement phase causes rapid tool deterioration, increased machining forces, and a poor surface finish. Moreover, the industrial focus on green manufacturing has led to a shift from traditional coolant-based machining to sustainable alternatives. In this context, researchers have optimized machining performance using advanced technological advancements and techniques. However, limited work is reported on modeling the machining performance of Al7075 nanocomposites during turning under compressed air cooling. **Methods of investigation.** Manufacturers can gain a better understanding of increasing the effectiveness of turning processes for Al7075 nanocomposites by creating a comprehensive model. Therefore, this work models the machining performance of hybrid Al7075 nanocomposites during turning under compressed air-cooling conditions with an artificial neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to predict tool wear (TW), surface roughness (R_a), and cutting force (F_c) as a function of process parameters. **Results and discussion.** In this work, an ANFIS model was developed to predict the machining performance considering the effect of process parameters such as cutting speed, feed rate, and depth of cut for different Al7075-based nanocomposites. These nanocomposites were prepared using silicon carbide (30–50 nm) and graphene (5–10 nm) nanoparticles as reinforcements by the stir casting process. Reinforcement materials affect the mechanical and physical properties of composites. For engineering applications, SiC and graphene are preferred reinforcements with distinctive features. ANFIS models were developed to predict R_a , F_c , and TW based on the experimental results. The Sugeno method was used to represent fuzzy rules and membership functions, as it utilizes weighted averages in the defuzzification process and offers better processing efficiency. The MATLAB ANFIS toolbox was used to design and tune fuzzy inference systems. The developed ANFIS model predicts machining responses effectively and offers a practical approach for optimizing process parameters with high reliability. The results of this research show good agreement between the experimental results and the predicted ANFIS outcomes, with an average prediction error below 8%. Specifically, the ANFIS model yielded errors of 5.1% for R_a , 13.45% for F_c , and 7.92% for TW . The model exhibited excellent agreement with experimental data, demonstrating high prediction accuracy and generalization capability. 3-D graphs are plotted for a better understanding of the effect of process parameters on F_c , R_a , and TW for different nanocomposites. The findings affirm the efficacy of compressed air cooling in improving machinability while minimizing environmental impact. Furthermore, the developed ANFIS model serves as a reliable tool for optimizing turning parameters for Al7075 composites, supporting the advancement of green manufacturing strategies. This research warrants further investigation into the application of ANFIS in machining processes, specifically exploring various metal matrix composite types and rigorously assessing the long-term effects of compressed air cooling on both environmental sustainability and tool life.

For citation: Chinchanikar S., Patil S., Kulkarni P. ANFIS modeling of turning Al7075 hybrid nanocomposites under compressed air cooling. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 48–61. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-48-61. (In Russian).

* Corresponding author

Satish Chinchanikar, 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.chinchanikar@vit.edu

References

1. Mohammed S.M.A.K., Nisar A., John D., Sukumaran A.K., Fu Y., Paul T., Hernandez A.F., Seal S., Agarwal A. Boron nitride nanotubes induced strengthening in aluminium 7075 composite via cryomilling and spark plasma sintering. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, vol. 8 (1), art. 155. DOI: 10.1007/s42114-024-01173-1.
2. Devitte C., Souza A.J., Amorim H.J. Impact of cooled compressed air and high-speed cutting on the drilling of hybrid composite-metal stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 125 (11), pp. 5445–5461. DOI: 10.1007/s00170-023-11083-z.
3. Kulkarni P., Chinchanikar S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2025, vol. 11 (1), pp. 421–449. DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.
4. Bagheri A., Abedini V., Hajalimohamadi A. Impact of machining parameters on surface roughness and machining forces in Al7075 turning with minimum quantity lubrication and cold fluid. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2025. DOI: 10.1177/09544089241308052.
5. Kulkarni P., Chinchanikar S. Modelling turning performance of Inconel 718 with hybrid nanofluid under MQL using ANN and ANFIS. *Fracture and Structural Integrity*, 2024, vol. 18 (70), pp. 71–90. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.70.04.
6. Prabhu S., Vinayagam B.K. Adaptive neuro fuzzy inference system modelling of multi-objective optimisation of electrical discharge machining process using single-wall carbon nanotubes. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2015, vol. 13 (2), pp. 97–117. DOI: 10.7158/M13-074.2015.13.2.
7. Sharma D., Bhowmick A., Goyal A. Enhancing EDM performance characteristics of Inconel 625 superalloy using response surface methodology and ANFIS integrated approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, vol. 37, pp. 155–173. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.01.005.
8. Hewidy M., Salem O. Integrating experimental modelling techniques with the Pareto search algorithm for multiobjective optimization in the WEDM of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 129 (1–2), pp. 299–319. DOI: 10.1007/s00170-023-12200-8.
9. Sen B., Mia M., Mandal U.K., Mondal S.P. GEP-and ANN-based tool wear monitoring: a virtually sensing predictive platform for MQL-assisted milling of Inconel 690. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105, pp. 395–410. DOI: 10.1007/s00170-019-04187-y.
10. Kumar A., Pradhan M.K. An ANFIS modelling and genetic algorithm-based optimization of through-hole electrical discharge drilling of Inconel-825 alloy. *Journal of Materials Research*, 2023, vol. 38 (2), pp. 312–327. DOI: 10.1557/s43578-022-00728-6.
11. Premnath A.A., Alwarsamy T., Sugapriya K. A comparative analysis of tool wear prediction using response surface methodology and artificial neural networks. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2014, vol. 12 (1), pp. 38–48. DOI: 10.7158/M12-075.2014.12.1.
12. Babu K.N., Karthikeyan R., Punitha A. An integrated ANN-PSO approach to optimize the material removal rate and surface roughness of wire cut EDM on INCONEL 750. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, pp. 501–505. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.643.
13. Imran M., Shuangfu S., Yuzhu B., Yuming W., Raheel N. Optimising subsurface integrity and surface quality in mild steel turning: A multi-objective approach to tool wear and machining parameters. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, vol. 35, pp. 3440–3462. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.01.246.
14. Subramanian M., Sakthivel M., Sooryaprakash K., Sudhakaran R. Optimization of cutting parameters for cutting force in shoulder milling of Al7075-T6 using response surface methodology and genetic algorithm. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 64, pp. 690–700. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.09.144.
15. Pramod R., Kumar G.V., Gouda P.S., Mathew A.T. A study on the Al_2O_3 reinforced Al7075 metal matrix composites wear behavior using artificial neural networks. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (5), pp. 11376–11385. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.105.
16. Kulkarni P., Chinchanikar S. Cutting force modeling during turning Inconel 718 using unitary Al_2O_3 and hybrid MWCNT + Al_2O_3 nanofluids under minimum quantity lubrication. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2025, vol. 19 (7), pp. 5185–5202. DOI: 10.1007/s12008-024-02120-6.
17. Chinchanikar S., Kulkarni P. 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.

18. Zare Chavoshi S. Tool flank wear prediction in CNC turning of 7075 AL alloy SiC composite. *Production Engineering*, 2011, vol. 5 (1), pp. 37–47. DOI: 10.1007/s11740-010-0282-x.
19. Veluchamy B., Karthikeyan N., Krishnan B.R., Sundaram C.M. Surface roughness accuracy prediction in turning of Al7075 by adaptive neuro-fuzzy inference system. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37, pp. 1356–1358. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.560.
20. Guvenc M.A., Bilgic H.H., Cakir M., Mistikoglu S. The prediction of surface roughness and tool vibration by using metaheuristic-based ANFIS during dry turning of Al alloy (AA6013). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, vol. 44 (10), p. 474. DOI: 10.1007/s40430-022-03798-z.
21. Ramakrishnan H., Balasundaram R., Selvaganapathy P., Santhakumari M., Sivasankaran P., Vignesh P. Experimental investigation of turning Al 7075 using Al_2O_3 nano-cutting fluid: ANOVA and TOPSIS approach. *SN Applied Sciences*, 2019, vol. 1 (12), p. 1639. DOI: 10.1007/s42452-019-1664-0.

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>).