

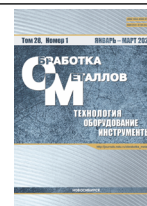
НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние технологических режимов обработки жаропрочного сплава MoTiC на основе молибдена на стойкость инструмента

Юрий Титов^{1, 2, a}, Евгений Кривонос^{1, b}, Вадим Аллагулов^{1, c, *}, Эрик Минибаев^{1, d},
 Николай Бобровский^{2, e}, Ренат Каменов^{2, f}

¹ Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Россия

² Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ), площадь Шокина, 1, Зеленоград, г. Москва, 124498, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-6454-8310>, tyrin-88@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-8485-1862>, evgenii.krivonos@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0009-0000-5427-7337>, vadim_allgul@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0009-0000-1539-053X>, ericminibaev@yandex.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-9299-2822>, bobrnmm@yandex.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-9181-5704>, renatkamenov@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.013

История статьи:

Поступила: 21 ноября 2025

Рецензирование: 24 ноября 2025

Принята к печати: 17 декабря 2025

Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Обработка резанием
 Жаропрочные сплавы
 Твердосплавная фреза
 Лезвийная обработка
 Стойкость твердосплавного инструмента
 Режимы резания
 Микрогеометрия поверхности
 Шероховатость
 Технологическая наследственность
 Вейвлет-анализ
 Поверхностное пластическое деформирование

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00298-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00298/>.

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное машиностроение характеризуется расширением применения жаропрочных сплавов для деталей аэрокосмической и оборонной техники. Особую сложность представляет обработка перспективных молибденовых сплавов, таких как Mo30TiC, из-за их высокой жаропрочности, абразивности и аномального поведения механических свойств при нагреве. Существующие технологические решения для никелевых сплавов оказываются малоэффективными, что обуславливает актуальность исследований в данной области. **Цель работы.** Разработка рациональных технологических режимов и стратегий лезвийной обработки жаропрочного сплава Mo30TiC, направленных на повышение стойкости режущего инструмента и обеспечение требуемого качества поверхности. **Методы исследования.** Проведены экспериментальные исследования на обрабатывающем центре Okuma MB-46BE с использованием твердосплавного инструмента от различных производителей. Изучалось влияние геометрических параметров инструмента (передний угол, скругление режущей кромки, наличие отрицательной фаски) и режимов резания (скорость, подача, глубина) на износ по задней поверхности и шероховатость. Контроль параметров осуществлялся с помощью оптической микроскопии и профилометрии. **Результаты и обсуждение.** Определены оптимальные геометрические параметры инструмента: передний угол 0°, скругление режущей кромки 0,5...1 мм, отрицательная фаска 0,05 мм. Разработаны две стратегии обработки: стандартное резание ($V_c = 50...72$ м/мин, $f_z = 0,03...0,04$ мм) для качественной обработки и силовое резание ($V_c = 12...17$ м/мин, $f_z = 0,08...0,1$ мм) для высокопроизводительной обработки. Установлено, что фрезы Karsan 99508003 и CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05 демонстрируют наилучшую стойкость. Показано, что нарастание износа инструмента приводит к экспоненциальному росту дисперсии параметров шероховатости Ra и Rz . **Выводы.** Комплекс предложенных технологических решений позволяет эффективно осуществлять обработку сплава Mo30TiC, контролируя износ инструмента и формируя заданное качество поверхности. Результаты работы имеют практическую значимость для машиностроительных предприятий, специализирующихся на обработке труднообрабатываемых материалов.

Для цитирования: Влияние технологических режимов обработки жаропрочного сплава MoTiC на основе молибдена на стойкость инструмента / Ю.В. Титов, Е.В. Кривонос, В.Р. Аллагулов, Э.Р. Минибаев, Н.М. Бобровский, Р.У. Каменов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 176–192. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-176-192.

Введение

Современное машиностроение, в особенности такие наукоемкие отрасли, как авиационное моторостроение, ракетостроение и космическая техника, характеризуется устойчивой тенденцией к увеличению доли сложных деталей из жа-

*Адрес для переписки

Аллагулов Вадим Ришатович, ассистент
 Омский государственный технический университет,
 пр. Мира, 11,
 630050, г. Омск, Россия
 Тел.: +7 908 102-68-22, e-mail: vadim_allagul@mail.ru

ропрочных и труднообрабатываемых сплавов [1, 2]. Это обусловлено требованиями к повышению рабочих параметров оборудования (температуры, давления, нагрузки), что, в свою очередь, ведет к использованию материалов, сохраняющих высокие механические свойства в экстремальных условиях. Широкое внедрение многоосевых обрабатывающих центров с ЧПУ позволило конструкторам практически нивелировать прежние технологические ограничения по геометрии изделий, однако перенесло основную сложность на этап их изготовления [3].

Ключевой проблемой механической обработки жаропрочных сплавов является их низкая теплопроводность по сравнению с конструкционными сталями. Вследствие этого основная часть тепла, генерируемая в зоне резания, не отводится со стружкой, а аккумулируется в поверхностном слое заготовки и в режущем инструменте, приводя к значительной теплосиловой напряженности процесса [1, 4]. Это вызывает ряд негативных явлений: структурно-фазовые превращения, возникновение остаточных напряжений, деформацию детали и интенсивный износ инструмента [5, 6]. Для снижения перечисленных эффектов на практике часто приходится существенно занижать режимы резания, что напрямую снижает производительность обработки на дорогостоящем оборудовании [7, 8].

Большинство фундаментальных и прикладных исследований в области резания жаропрочных сплавов сфокусировано на материалах на основе никеля, таких как сплавы типа инконель [9, 10]. В то же время сплавы на основе молибдена, обладающие уникальным комплексом свойств – высокой удельной прочностью, температурой плавления и стойкостью к ползучести, – изучены в контексте механической обработки явно недостаточно. В частности, перспективный сплав Mo30TiC характеризуется не только высокой жаропрочностью, но и значительной вязкостью, а также аномалией механических свойств – ростом предела прочности при повышении температуры до определенного значения [11, 12].

Механизм лезвийной обработки жаропрочного сплава MoTiC на основе молибдена до сих пор до конца не изучен. Под воздействием силы и тепла в зоне резания происходят сложные процессы разупрочнения и упрочнения, что при-

водит к резким изменениям нагрузки при фрезеровании и резким перепадам температур на поверхности инструмента. Эти перепады ускоряют износ или повреждение инструмента, в конечном итоге снижая качество обработки детали [13]. Твердосплавные монолитные фрезы часто используются при фрезеровании, поэтому их износ привлекает большое внимание исследователей во всем мире.

Классическое фрезерование генерирует значительное тепловыделение при резании, пиковые температуры превышают 1000 °C. Эти экстремальные условия изменяют свойства материала в зоне резания, создают значительные температурные градиенты на поверхности заготовки и вызывают резкое приращение сил резания [6]. В результате возникают остаточные деформации, индуцированные напряжения и поверхностные микротрещины, существенно влияющие на размерную точность, целостность поверхности и общую надежность конечного компонента.

Среди прочих факторов, влияющих на качество поверхности, стабильность обработки и стойкость инструмента, двумя основными являются силы резания и температуры в зоне обработки [14]. Было проведено множество исследований для количественной оценки и анализа этих параметров при обработке жаропрочных сплавов на основе молибдена. Примечательно, что радиус режущей кромки существенно влияет на величину и распределение сил резания [15]. Исследователь [16] предложил эмпирическую модель для прогнозирования подачи и основных сил резания, подчеркивая сильную корреляцию между радиусом кромки и результирующими силами, и дал ценные рекомендации по оптимизации параметров резания для повышения эффективности обработки и точности деталей.

Для фрезерования молибденовых суперсплавов широко используются твердосплавные монолитные инструменты благодаря их относительно низкой стоимости по сравнению с конкурентами из керамики. Однако высокие температуры могут изменить состав и механические свойства материала инструмента, увеличивая его износ и снижая производительность [17]. Кроме того, температура резания напрямую влияет на распределение касательных напряжений в зоне резания, тем самым влияя на стабильность про-

цесса обработки. Исследователи также использовали подходы к моделированию динамических систем, такие как модели с одной степенью свободы, для прогнозирования динамических сил резания в различных тепловых условиях, подчеркивая взаимосвязанную термомеханическую природу процесса обработки [11–13].

Фрезы из твёрдого сплава широко применяются в получистовых и чистовых операциях. Износ инструмента существенно влияет на качество детали, включая шероховатость поверхности, остаточные напряжения, сколы на поверхности и упрочнение, вызванное механической обработкой [15]. Исследователи [16] провели экспериментальные исследования, которые выявили сильный износ инструмента при фрезеровании жаропрочных сплавов, определив его как ключевой фактор ухудшения качества поверхности. Тщательное изучение процесса фрезерования и анализ поверхности показали, что по мере износа инструмента поверхностные дефекты, такие как повышенная шероховатость, микротрещины и размерные неточности, становились более выраженными, что подчеркивает критическую важность эффективного управления износом.

При обработке молибденовых жаропрочных сплавов было выявлено несколько различных механизмов износа, включая износ по задней поверхности, износ по канавкам, абразивный износ, адгезионный износ и диффузионный износ. Износ по задней поверхности привлек наибольшее внимание ввиду его прямого влияния на размерную точность и качество поверхности [17–20]. Многочисленные исследования подтвердили, что износ задней поверхности является доминирующим фактором, определяющим срок службы инструмента и эффективность обработки указанных сплавов [6, 21–23].

Несмотря на высокую твёрдость и термостойкость, твердосплавные инструменты по-прежнему подвержены быстрому износу, частой замене и сокращению срока службы при классической обработке молибденовых жаропрочных сплавов. Эти факторы подчеркивают необходимость точного контроля параметров обработки, в частности скорости резания, для оптимизации производительности инструмента и продления срока его службы.

При обработке резанием инструменты из твёрдого сплава генерируют значительное ко-

личество тепла на границе раздела инструмента и заготовки, при этом температура резания часто превышает 800 °С. Такие повышенные температуры могут существенно изменить механические свойства и микроструктуру твердосплавных инструментов, снижая их режущую способность и срок службы. Исследователь [24–26] внёс значительный вклад в понимание тепловых эффектов при обработке на станках, проанализировав распределение тепла во время фрезерования. Благодаря сочетанию экспериментального и теоретического моделирования авторы [27] объяснили взаимосвязь между распределением тепла, параметрами резания и характером износа инструмента, предложив ценные теоретические идеи по управлению тепловым режимом и стратегиям снижения износа. В совокупности эти исследования продемонстрировали, что эффективный контроль износа инструмента и тепловыделения при резании не только повышает эффективность обработки, но и значительно улучшает качество и надежность критически важных компонентов аэрокосмической, энергетической и военной промышленности. Тем не менее сохраняются проблемы, в частности связанные с точным прогнозированием износа инструмента в сложных условиях резания, управлением распределением тепловыделения при фрезеровании и разработкой современных твердосплавных инструментов, способных сохранять структурную целостность в экстремальных условиях. Исследования в этих областях имеют решающее значение для совершенствования технологий обработки и улучшения результатов в высокопроизводительных производственных условиях.

Существующие стратегии оптимизации процесса, включая варьирование геометрических параметров инструмента (передний угол, радиус скругления режущей кромки), режимных параметров (скорость резания, подача, глубина) и применение современных методов охлаждения (в том числе с использованием криогенных сред – жидкого азота), демонстрируют свою эффективность для никелевых и титановых сплавов. Однако их прямое перенесение на обработку молибденового сплава Mo30TiC некорректно ввиду фундаментальных различий в физико-механических свойствах и поведении материалов в зоне резания (рис. 1). Таким образом, существует очевидный разрыв между потребностями

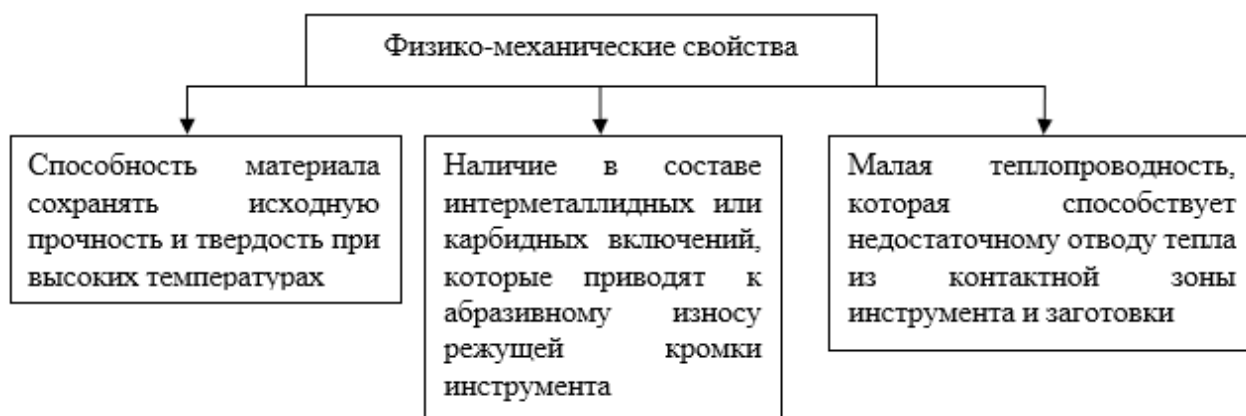


Рис. 1. Физико-механические свойства

Fig. 1. Physical and mechanical properties

современного производства и имеющейся научно-технической базой данных, что определяет актуальность настоящего исследования.

Целью данной работы является разработка рациональных технологических режимов и стратегий лезвийной обработки жаропрочного сплава Mo30TiC на обрабатывающем центре Okuma MB-46BE, направленных на повышение стойкости режущего инструмента и обеспечение требуемого качества поверхности. Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

- определение оптимальных геометрических параметров режущего инструмента для минимизации абразивного износа по задней поверхности;
- разработка рациональной стратегии фрезерования, учитывающей особенности силового и скоростного резания;

– поиск и верификация режимов резания, обеспечивающих баланс между производительностью и стойкостью инструмента;

– исследование зависимости шероховатости обработанной поверхности от технологических параметров процесса.

Методика исследований

Объектом исследования служил жаропрочный дисперсно-упрочненный сплав на основе молибдена Mo30TiC. Заготовка представляла собой цилиндр диаметром 20 мм и длиной 90 мм. Для надежного крепления в силовых тисках обрабатывающего центра на электроэрозионном станке Sodick VZ300L была сформирована технологическая база в виде прямоугольного хвостовика на торце заготовки (рис. 2).

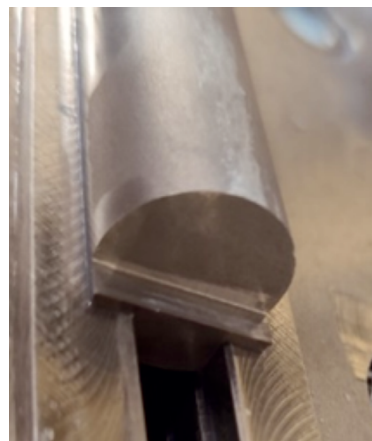


Рис. 2. Образец заготовки из сплава Mo30TiC с технологическим хвостовиком

Fig. 2. Workpiece sample made of Mo-30TiC alloy with a technological shank

Химический состав материала приведен в табл. 1, а основные физико-механические свойства, обуславливающие его труднообрабатываемость, – в табл. 2.

Эксперименты проводились на пятиосевом обрабатывающем центре Okuma MB-46BE. Охлаждение осуществлялось водно-эмульсионной СОЖ AdvaCut A2 (концентрация 7 %) под стандартным давлением.

Для исследования использовался серийный твердосплавный инструмент от ведущих производителей: Karcap Cutting Tools (Турция), JJ Tools (Южная Корея), CNCINS/«ИнСистенс» (Китай/Россия) (табл. 3). Были выбраны концевые фрезы диаметром 8 мм со схожими геометрическими параметрами для обеспечения сопоставимости результатов:

- задний угол (α): 12°;
- передний угол (γ): 5°;
- угол наклона винтовой канавки (ω): 40°;
- число зубьев (z): 4.

Инструмент устанавливался в гидропластовые оправки фирмы SCHUNK с минимально возможным вылетом (не более 1,5 диаметра фрезы) для максимального повышения жесткости

системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) (рис. 3).

Современная практика обработки жаропрочных сплавов предлагает два принципиально разных технологических подхода.

Первый подход предполагает использование острого инструмента с пониженными значениями подачи на зуб (0,05...0,1 мм). Данная стратегия позволяет достичь высокого качества обработанной поверхности, однако характеризуется относительно низкой производительностью. Эффективность обработки при этом оценивается по-разному: для черновых операций ключевым показателем является объем снятой стружки за период стойкости инструмента, тогда как для чистовых – площадь обработанной поверхности за тот же интервал времени.

Альтернативная стратегия основана на применении инструмента с упрочненной режущей кромкой, имеющей отрицательную фаску или радиус скругления около 0,05 мм. Такая геометрия способствует формированию в прилегающей зоне упрочненного слоя обрабатываемого материала, который выполняет защитную функцию и снижает интенсивность абразивного износа режущей

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава Mo30TiC, % (масс.)

Chemical composition of Mo-30TiC alloy (wt. %).

Mo / Mo	Ti / Ni	C / C	Другие элементы / Other elements
Основа / Base	28...32	0,8...1,2	< 0,5

Таблица 2

Table 2

Физико-механические свойства сплава Mo30TiC

Physical-mechanical properties of Mo-30TiC alloy

Свойство / Property	Значение / Meaning	Примечание / Note
Твердость / Hardness	45...47 HRC	–
Предел прочности σ_b / Ultimate strength, σ_u	450...460 МПа (при 20 °C)	Возрастает до ~600 МПа при 600 °C / Increases to ~600 МПа at 600 °C
Относительное удлинение δ / Relative elongation, δ	0,5...1,0 %	–
Модуль упругости E / Modulus of elasticity, E	~320 ГПа	–
Теплопроводность / Thermal conductivity	Низкая / Low	Интенсивная локализация тепла в зоне резания / Intense heat localization in the cutting area

Используемый инструмент

Tools used in the study

Параметр / Parameter	Фреза Karcan 99508003	Фреза JJ Tools 4SUE080120S08	Фреза CNCINS MS15. Z5.08.19.63.38.R05
Производитель / Manufacturer	Karcan Cutting Tools (Турция)	JJ Tools (Южная Корея)	CNCINS/«ИнСистенс» (Китай/Россия)
Обозначение / Designation	99508003	4SUE080120S08	MS15.Z5.08.19.63.38.R05
Диаметр, мм / Diameter, mm	8	8	8
Число зубьев z / Number of teeth z	4	4	4
Передний угол γ , град / Rake angle γ , grad	5°	5°	5°
Задний угол α , град / Clearance angle α , grad	12°	12°	12°
Угол наклона винтовой канавки ω , град / Angle of helical flute ω , grad	40°	40°	40°
Конструктивные особенности / Design features	Усиленный сердечник, ориентированный на повышенную жесткость / Reinforced core for enhanced rigidity	Специальная геометрия стружкодробления / Special chip-breaking geometry	Радиус скругления режущей кромки $R 0,5$ мм / Cutting edge radius $R 0.5$ mm
Материал / Покрытие / Material / Coating	Твердый сплав / Износостойкое покрытие (TiAlN) / Carbide / Wear-resistant coating (TiAlN)	Твердый сплав / Износостойкое / покрытие (TiAlN) / Carbide / Wear-resistant coating (TiAlN)	Твердый сплав / Износостойкое покрытие (TiAlN) / Carbide / Wear-resistant coating (TiAlN)



Рис. 3. Выбранный инструмент в гидропластовой оправке фирмы SCHUNK

Fig. 3. Tool mounted in a SCHUNK hydroplastic holder

кромки. Это позволяет увеличить подачу на зуб примерно в три раза по сравнению с первым подходом и существенно повысить объем съема материала. Компромиссом является необходимость снижения скорости резания для минимизации те-

пловыделения. Несмотря на некоторое снижение производительности, основной выигрыш достигается за счет многократного увеличения стойкости инструмента и снижения его расхода, что подтверждается предварительными испытаниями.

Диапазоны варьирования основных технологических параметров, выбранные на основе анализа литературы и рекомендаций производителей, представлены в табл. 4.

Для оценки эффективности каждого подхода проводился мониторинг двух ключевых параметров: износа инструмента и качества обработанной поверхности.

Основным критерием затупления была принята ширина фаски износа по задней поверхности (VB). Измерения проводились для каждого зуба фрезы с помощью оптического микроскопа УИМ-21. Регистрировалась максимальная величина VB , и критерием окончания стойкости принималось значение $VB = 0,3$ мм или начало катастрофического выкрашивания режущей кромки.

Качество поверхности измерялась параметром Ra (среднее арифметическое отклонение профиля) с помощью портативного профилометра MAHR MarSurf PS1. Замеры проводились в пяти точках вдоль направления подачи. Визуально оценивалось наличие или отсутствие дефектов, таких как выкрашивание, заусенцы и термически пораженные зоны (цвета побежалости).

Результаты и их обсуждение

Первый этап эксперимента был посвящен предварительной оценке поведения различных инструментов при обработке сплава Mo30TiC в режимах, рекомендованных производителями. Результаты визуального и аудиального анализа представлены в табл. 5 и на рис. 4–6.

Все протестированные фрезы продемонстрировали стабильное образование сегментной стружки без признаков термического воздействия (побежалости), что свидетельствует об отсутствии критического перегрева в зоне резания. Важным результатом является полное отсутствие сколов по краям обработанных зон, что подтверждает пригодность выбранных режимов для чистовой обработки с высокими требованиями к качеству кромки.

Наибольшую виброустойчивость продемонстрировала фреза Karcan 99508003, что, вероятно, связано с оптимальным сочетанием ее геометрии и динамической жесткости всей технологической системы. Визуальный анализ инструмента после обработки (рис. 7–9) не выявил катастрофических повреждений, однако последующие этапы были направлены на количественную оценку износа.

Таблица 4

Table 4

Рекомендуемые и экспериментальные режимы резания
Recommended and experimental cutting conditions

Инструмент / The tool		n , об/мин / n , rpm	f_z , мм	A_p , мм	A_e , мм	t , с	V , мм ³
1	Karcan 99508003	2875	0,05	12	1	2	393,6
		2875	0,03	12	2	5	787,2
		2000	0,05	12	1,2	55	4920,2
2	Karcan 111408002	3500	0,05	12	1	3	393,6
3	Karcan 101408002	3000	0,05	12	1	4	393,6
4	JJ Tools 4SUE080120S08	1600	0,04	12	1	8	393,6
		200	0,15	12	3	21	1180,8
		400	0,15	12	2	15	1180,8
		600	0,15	12	2	3	393,6
5	CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05	955	0,01	12	1	25	393,6

Результаты предварительного тестирования инструмента

Results of preliminary tool testing

Инструмент / Tool	Karcan 99508003	JJ Tools 4SUE080120S08	CNCINS MS15. Z5.08.19.63.38.R05
Визуальный анализ стружки / Visual chip analysis	Сегментная, без следов перегрева / Segmented, no signs of overheating	Сегментная, без следов перегрева / Segmented, no signs of overheating	Сегментная, без следов перегрева / Segmented, without signs of overheating
Целостность кромки детали / Part edge integrity	Отсутствуют сколы / No chipping	Отсутствуют сколы / No chipping	Отсутствуют сколы / No chipping
Виброакустические характеристики / Vibroacoustic characteristics	В норме / Within acceptable range	Присутствуют легкие вибрации / Slight vibrations present	Присутствуют незначительные вибрации / Minor vibrations present

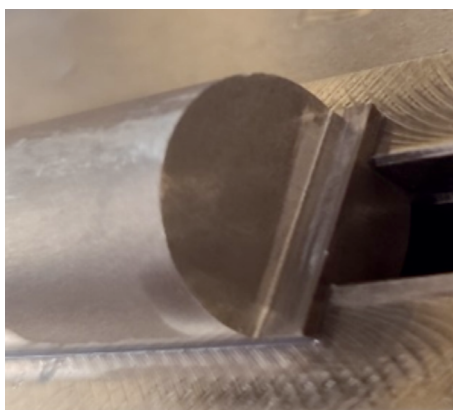


Рис. 4. Поверхность образца после Karcan 99508003

Fig. 4. Sample surface after machining with Karcan 99508003



Рис. 5. Поверхность образца после JJ Tools 4SUE080120S08

Fig. 5. Sample surface after machining with JJ Tools 4SUE080120S08



Рис. 6. Поверхность образца после CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05

Fig. 6. Sample surface after machining with CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05

Для углубленного исследования была выбрана фреза JJ Tools 4SUE080120S08, на которой изучалось влияние силового фрезерования с повышенной подачей и глубиной резания при критически низких скоростях (200, 400, 600 об/мин). При этом увеличивались подача на зуб и глубина резания в осевом направлении, как показано в табл. 6.

Результаты (табл. 6) показали общие проблемы для данного режима:

1) появление сколов по краям зоны съема материала со стороны врезания, вызванных ударными нагрузками;

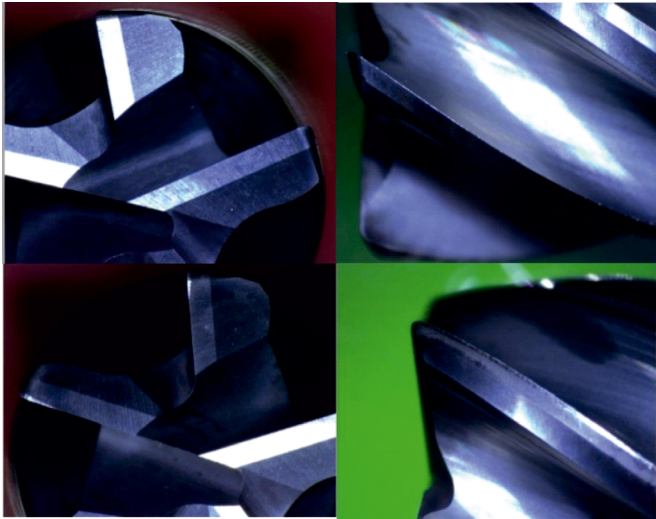


Рис. 7. Фреза Karcan 99508003:
вверху – до обработки, внизу – после обработки

Fig. 7. Karcan 99508003 end mill:
top – before machining, bottom – after machining

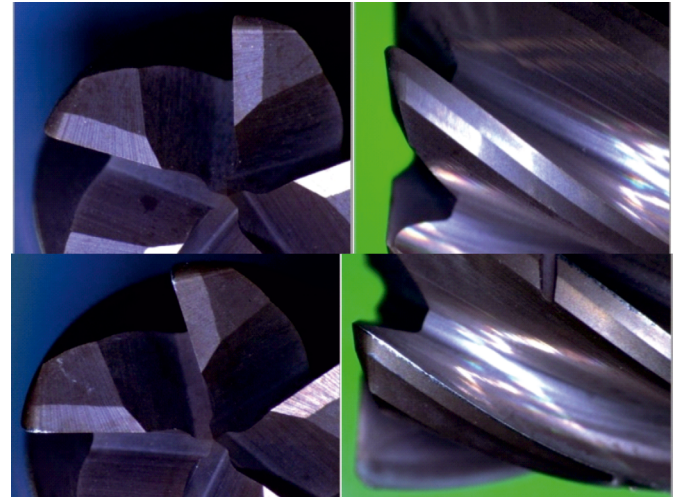


Рис. 9. Фреза CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05:
вверху – до обработки, внизу – после обработки

Fig. 9. CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05 end mill:
top – before machining, bottom – after machining

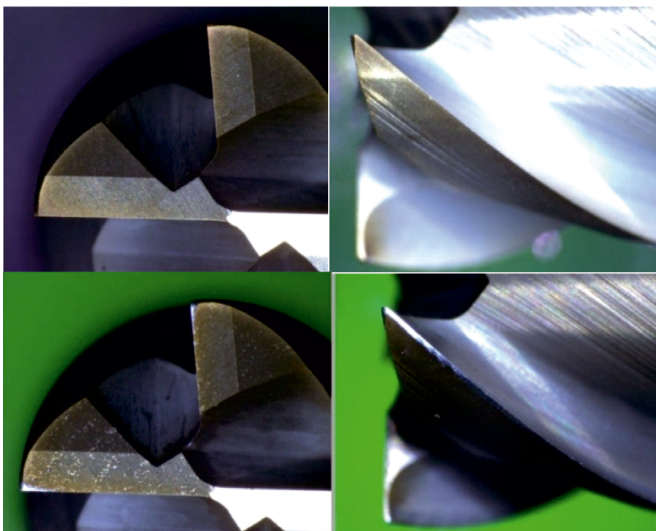


Рис. 8. Фреза JJ Tools 4SUE080120S08:
вверху – до обработки, внизу – после обработки

Fig. 8. JJ Tools 4SUE080120S08 end mill:
top – before machining, bottom – after machining

2) образование дополнительной грани на выходе фрезы, что свидетельствует о пластическом течении материала и высоких контактных давлениях;

3) явно выраженные вибрации и ударные воздействия.

Несмотря на эти негативные явления, износ по задней поверхности оставался незначительным, что подтверждает эффективность стратегии работы с упрочненной режущей кромкой для

борьбы с абразивным износом. Однако ударные нагрузки ограничивают применимость данного подхода для обработки ответственных контуров.

На заключительном этапе тестирования фрезы Karcan 99508003 в среднем диапазоне режимов (табл. 7) позволило найти компромисс. Работа велась в средних диапазонах скорости резания и подачи, но с сохранением рекомендуемых шагов фрезерования в осевом и радиальном направлениях. Были отмечены лишь незначительные сколы при сохранении благоприятных виброакустических характеристик. Это позволяет рекомендовать данный инструмент и режимы для полуставовой обработки.

Была исследована зависимость параметров шероховатости Ra от подачи и геометрии инструмента (табл. 8). Направление вращения (S) и подачи (F) фрезы показаны на рис. 13.

Анализ полученных профилей и построенная на их основе 3D-модель поверхности (рис. 14) выявили следующую закономерность: с увеличением подачи на зуб закономерно возрастает шаг неровностей, что приводит к увеличению параметра Rz . Однако использование инструмента с упрочненной кромкой (JJ Tools) даже на повышенных подачах позволяло получить более предсказуемый и равномерный микрорельеф по сравнению с острым инструментом при аналогичных условиях, где наблюдалась тенденция к возникновению микрозадилов.

Результаты режимов резания на износ и качество поверхности

Effect of cutting parameters on tool wear and surface quality

Инструмент / Tool	JJ Tools 4SUE080120S08		
Обороты шпинделя / Spindle speed	200 об/мин (рис. 10) / 200 rpm (fig. 10)	400 об/мин (рис. 11) / 400 rpm (fig. 11)	600 об/мин (рис. 12) / 600 rpm (fig. 12)
Визуальный анализ стружки / Visual chip analysis	Сегментная, без следов перегрева / Segmented, no signs of overheating	Сегментная, без следов перегрева / Segmented, no signs of overheating	Сегментная, без следов перегрева / Segmented, no signs of overheating
Целостность кромки детали / Part edge integrity	Присутствуют сколы по краям зоны съема материала со стороны врезания / Chipping along the edges of the machined area on the entry side	Присутствуют сколы по краям зоны съема материала со стороны врезания / Chipping along the edges of the machined area on the entry side	Присутствуют сколы по краям зоны съема материала со стороны врезания / Chipping along the edges of the machined area on the entry side
Виброакустические характеристики / Vibroacoustic characteristics	Присутствуют вибрации. Ударные воздействия при врезании / Vibrations present. Impact loads during tool entry	Присутствуют вибрации / Vibrations present	Присутствуют вибрации. Ударные воздействия при врезании / Vibrations present. Impact loads during tool entry
Целостность кромки инструмента / Tool edge integrity	На выходе фрезы от материала образуется дополнительная грань / Burr formation at the tool exit from the material	На выходе фрезы от материала образуется дополнительная грань / Burr formation at the tool exit from the material	На выходе фрезы от материала образуется дополнительная грань / Burr formation at the tool exit from the material

Рис. 10. Поверхность образца после Karcan 99508003

Fig. 10. Sample surface after machining with Karcan 99508003

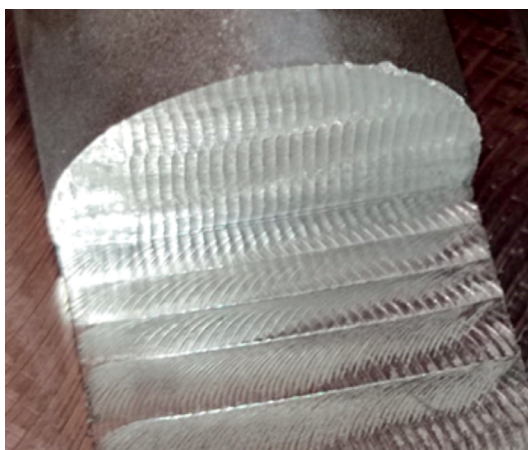
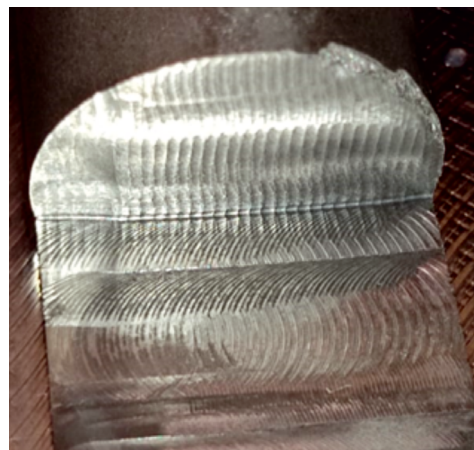


Рис. 11. Поверхность образца после JJ Tools 4SUE080120S08

Fig. 11. Sample surface after machining with JJ Tools 4SUE080120S08



Рис. 12. Поверхность образца после CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05

Fig. 12. Sample surface after machining with CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05

Таблица 7

Table 7

Результаты в среднем диапазоне режимов

Performance assessment in the medium parameter range

Инструмент / Tool	Karcan 99508003
Визуальный анализ стружки / Visual chip analysis	Стружка сегментная, без следов перегрева / Segmented chips, no signs of overheating
Целостность кромки детали / Part edge integrity	Присутствуют небольшие сколы по краям зоны съема материала / Minor chipping along the edges of the machined area
Виброакустические характеристики / Vibroacoustic characteristics	Звуковибрационные показатели в норме / Vibroacoustic parameters within acceptable range

Таблица 8

Table 8

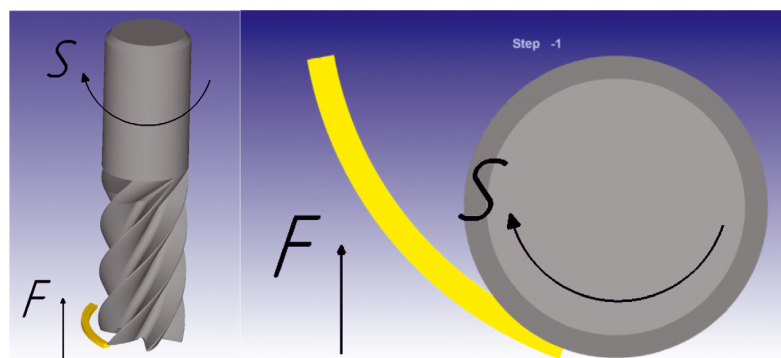
Результаты шероховатости обработанной поверхности

Machined surface roughness results

Инструмент с заданным углом резания 12° / A tool with a preset cutting angle of 12°					
Подача на зуб f_z , мм/зуб / Feed per tooth f_z (mm/tooth)	Шероховатость обработанной поверхности Ra для стандартного резания / Surface roughness (Ra) for standard cutting				
	Номер измерений / Measurement number				
	1	2	3	4	5
0,03	2,42	2,35	2,42	2,23	2,32
0,04	4,01	3,98	4,11	4,13	3,94

Рис. 13. Направление вращения S и направление подачи F фрезы

Fig. 13. Cutter rotation direction (S) and feed direction (F)



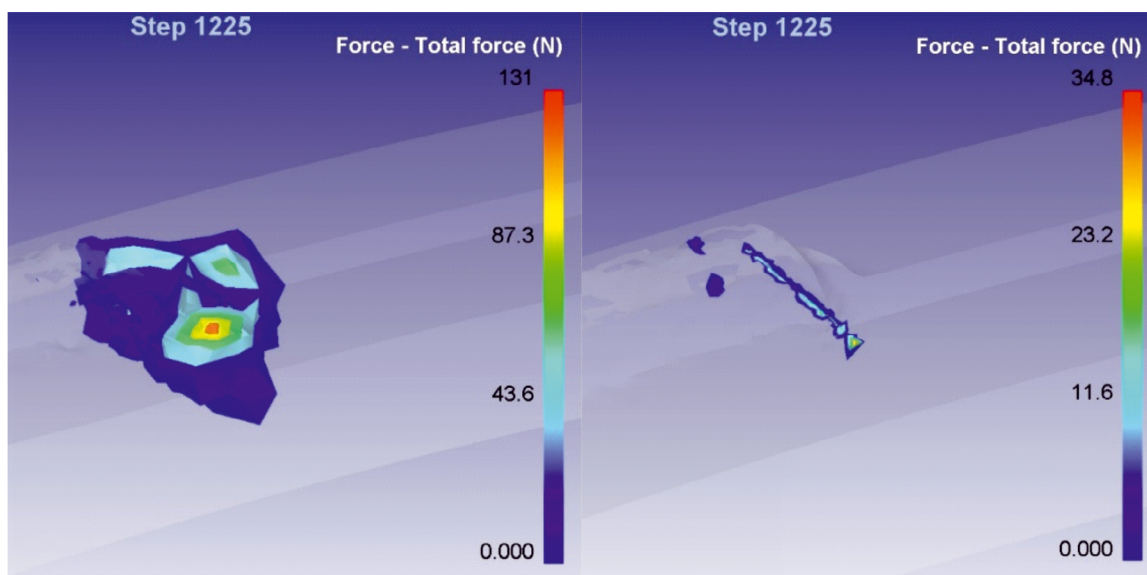


Рис. 14. Начальная 3D-модель поверхности

Fig. 14. Initial 3D surface model

На рис. 15 представлена зависимость величины износа от времени работы.

Анализ графика зависимости износа от времени обработки при различных скоростях резания выявил следующие закономерности. Наиболее интенсивный износ наблюдается при скорости 50 м/мин (кривая 1), когда критическое значение ширины фаски износа 0,1 мм достигается уже через 5...7 минут обработки. Снижение скорости до 35 м/мин (кривая 2) позволяет увеличить период стойкости до 15...17 минут, а при скорости 25 м/мин (кривая 3) инструмент сохраняет работоспособность в течение 25 минут при минимальном значении износа.

Полученные данные убедительно демонстрируют обратную зависимость между скоростью

резания и стойкостью инструмента. Уменьшение скорости с 50 до 25 м/мин позволило увеличить ресурс работы инструмента более чем в три раза. Наилучшие результаты при обработке жаропрочного сплава Mo30TiC достигаются при скоростях резания 25...35 м/мин, что обеспечивает оптимальный баланс между производительностью и стойкостью инструмента.

Выводы

В результате проведенного исследования была достигнута цель работы – разработаны рациональные технологические режимы и стратегии лезвийной обработки жаропрочного сплава Mo30TiC, обеспечивающие повышение стойко-

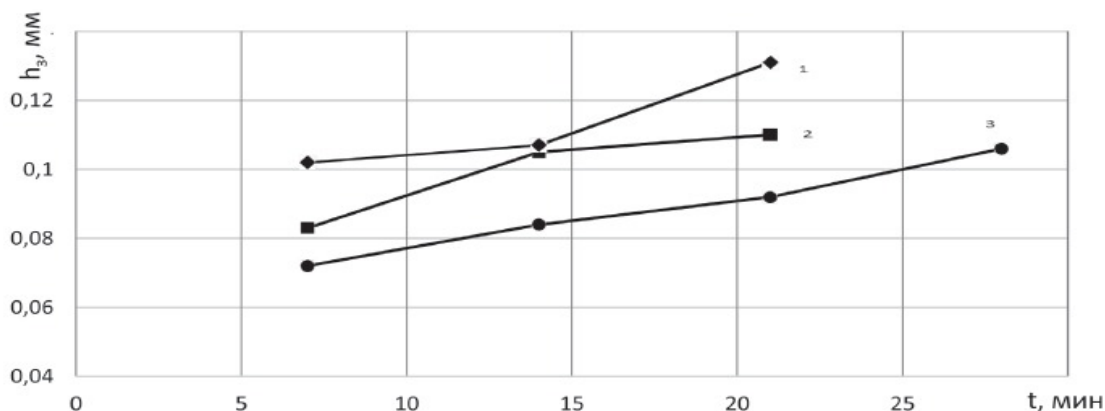


Рис. 15. График зависимости величины износа от времени работы

Fig. 15. Tool wear as a function of machining time

сти инструмента и требуемое качество поверхности. Поставленные задачи решены следующим образом.

1. Определены оптимальные геометрические параметры режущего инструмента, минимизирующие абразивный износ по задней поверхности. Наилучшие результаты показала геометрия с передним углом 0° , скруглением режущей кромки 0,5...1 мм и отрицательной фаской 0,05 мм с углом 18° ... 20° . Инструмент должен иметь не менее четырех зубьев для обеспечения жесткости и производительности. Среди протестированных образцов фрезы Karsan 99508003 и CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05 обладают наиболее подходящей геометрией.

2. Разработана рациональная стратегия фрезерования, учитывающая особенности силового резания. Стратегия предусматривает использование усиленного хвостовика, глубину фрезерования 1...1,5 от диаметра фрезы и радиальное перекрытие до 40 %. Ключевым требованием является исключение переменной контактной нагрузки для обеспечения постоянного сечения снимаемой стружки, что предотвращает вибрации и ударные нагрузки.

3. Найдены и верифицированы режимы резания, обеспечивающие баланс между производительностью и стойкостью инструмента:

– для стандартного резания (оптимизировано под качество поверхности): скорость резания $V_c = 50$... 72 м/мин, подача на зуб $f_z = 0,03$... $0,04$ мм;

– для силового резания (оптимизировано под производительность): скорость резания $V_c = 12$... 17 м/мин, подача на зуб $f_z = 0,08$... $0,1$ мм.

4. Исследована зависимость шероховатости от технологических параметров. Установлено, что стойкость инструмента является системообразующим фактором. Нарастание износа приводит к экспоненциальному росту дисперсии параметров Ra и Rz , увеличивая амплитуду высокочастотных составляющих в профиле поверхности. Поддержание инструмента в состоянии стабильного износа критически важно не только для производительности, но и для обеспечения прогнозируемых параметров поверхности, необходимых для последующих операций, например поверхностного пластического деформирования (выглаживания).

Таким образом, комплекс предложенных решений – от выбора геометрии инструмента

и стратегии обработки до конкретных режимов резания – позволяет эффективно осуществлять лезвийную обработку труднообрабатываемого жаропрочного сплава Mo30TiC, контролируя износ инструмента и формируя заданное качество поверхности.

Список литературы

1. FE analysis on the association between tool edge radius and thermal-mechanical load in machining Inconel 718 / Y. Liu, A. Hrechuk, M. Agmell, A. Ahadi, J.E. Stahl, J. Zhou // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 102. – P. 91–96. – DOI: 10.1016/j.procir.2021.09.016.
2. Thellaputta G.R., Chandra P.S., Rao C.S.P. Machinability of nickel based superalloys: a review // *Materials Today: Proceedings*. – 2017. – Vol. 4 (2). – P. 3712–3721. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.266.
3. Richards N., Aspinwall D. Use of ceramic tools for machining nickel based alloys // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1989. – Vol. 29 (4). – P. 575–588. – DOI: 10.1016/0890-6955(89)90072-2.
4. Wilson A.S. Formation and effect of topologically close-packed phases in nickel-base superalloys // *Materials Science and Technology*. – 2017. – Vol. 33 (9). – P. 1108–1118. – DOI: 10.1080/02670836.2016.1187335.
5. Machinability of Inconel 718: a critical review on the impact of cutting temperatures / K. Mahesh, J.T. Philip, S.N. Joshi, B. Kuriachen // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 36 (7). – P. 753. – DOI: 10.1080/10426914.2020.1843671.
6. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity / F. Veiga, M. Arizmendi, A. Jiménez, A.G.D. Val // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2021. – Vol. 204. – P. 106524. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106524.
7. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools / A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere // *Wear*. – 2007. – Vol. 262 (7–8). – P. 931–942. – DOI: 10.1016/j.wear.2006.10.009.
8. Zhu D., Zhang X., Ding H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2013. – Vol. 64. – P. 60–77. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001.
9. Hayajneh M.T., Astakhov V.P., Osman M.O.M. An analytical evaluation of the cutting forces in orthogonal cutting using a dynamic model of the shear zone with parallel boundaries // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – Vol. 82 (1–3). – P. 61–77. – DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00021-1.

10. Wear patterns and mechanisms of sialon ceramic end-milling tool during high speed machining of nickel-based superalloy / Y. Li, B. Zou, Z. Shi, C. Huang, L. Li, H. Liu, H. Zhu, P. Yao, J. Liu // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47 (4). – P. 5690–5698. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.10.155.

11. Experimental study and modeling of cutting force in high-speed milling of Ti-6Al-4V titanium alloy / M. Huahong, X. Wenchao, W. Lan, Z. Ziyuan, T. Zhibiao, L. Zhibiao // *Journal of Mechanics*. – 2025. – Vol. 41. – P. 55–63. – DOI: 10.1093/jom/ufaf006.

12. Digital twin-based dynamic prediction of thermomechanical coupling for skiving process / L. Zhang, J. Liu, X. Wu, C. Zhuang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – Vol. 131 (11). – P. 5471–5488. – DOI: 10.1007/s00170-022-08908-8.

13. Radu P., Schnakovszky C. A review of proposed models for cutting force prediction in milling parts with low rigidity // *Machines*. – 2024. – Vol. 12 (2). – P. 140. – DOI: 10.3390/machines12020140.

14. El-Wardany T.I., Mohammed E., Elbestawi M.A. Cutting temperature of ceramic tools in high speed machining of difficult-to-cut materials // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1996. – Vol. 36 (5). – P. 611–634. – DOI: 10.1016/0890-6955(95)00043-7.

15. Grzesik W. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools // *Wear*. – 2008. – Vol. 265. – P. 327. – DOI: 10.1016/j.wear.2007.11.001.

16. Effects of machining parameters on surface integrity when turning Inconel 718 / L. Tan, C. Yao, X. Li, Y. Fan, M. Cui // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2022. – Vol. 31. – P. 4176. – DOI: 10.1007/s11665-021-06523-4.

17. Tool wear in nickel-based superalloy machining: an overview / R. Wang, D. Yang, W. Wang, F. Wei, Y. Lu, Y. Li // *Processes*. – 2022. – Vol. 10. – P. 2380. – DOI: 10.3390/pr10112380.

18. Predicting wear mechanisms of ultra-hard tooling in machining Ti6Al4V by diffusion couples and simulation / R. Lindvall, A. Bjerke, A. Salmasi, F. Lenrick, R. M'Saoubi, J.-E. Ståhl, V. Bushlya // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2023. – Vol. 43. – P. 291–303. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.10.005.

19. Zhu D., Zhang X., Ding H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2013. – Vol. 64. – P. 60–77. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001.

20. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials / R. M'Saoubi, D. Axinte, S.L. Soo, C. Nobel, H. Attia, G. Kappmeyer, S. Engin, W.-M. Sim // *CIRP Annals*. – 2015. – Vol. 64. – P. 557–580. – DOI: 10.1016/j.cirp.2015.05.002.

21. Effects of cutting parameters on tool wear in milling inconel 625 superalloys with a SiAlON ceramic and the prediction of tool life / S. Güven, H. Gökkaya, G. Sur, A.R. Motorcu // *Ceramics International*. – 2025. – Vol. 51. – P. 5646–5658. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.12.012.

22. Analysis of cutting responses of sialon ceramic tools in high-speed milling of FGH96 superalloys / W. Ming, X. Huang, M. Ji, J. Xu, F. Zou, M. Chen // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47. – P. 149–156. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.118.

23. Online tool wear prediction based on cutting force coefficients identification using neural network / G. Wang, M. Wang, P. Gao, B. Yang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2025. – Vol. 136. – P. 5153–5173. – DOI: 10.1007/s00170-025-15044-6.

24. Kitagawa T., Kubo A., Maekawa K. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn // *Wear*. – 1997. – Vol. 202. – P. 142–148. – DOI: 10.1016/S0043-1648(96)07255-9.

25. High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools / N. Narutaki, Y. Yamane, K. Hayashi, T. Kitagawa, K. Uehara // *CIRP Annals*. – 1993. – Vol. 42. – P. 103–106. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62402-0.

26. Seleznev A., Pinargote N.W.S., Smirnov A. Ceramic cutting materials and tools suitable for machining high-temperature nickel-based alloys: a review // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – P. 1385. – DOI: 10.3390/met11091385.

27. Wear behavior of SiAlON ceramic tool and its effects during high-speed cutting, ceramics international / W. Yu, W. Ming, Q. An, M. Chen // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49. – P. 26694–26706. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.05.205.

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



Influence of processing parameters on tool life in machining the heat-resistant molybdenum-based MoTiC alloy

Yury Titov^{1,2,a}, Evgeny Krivonos^{1,b}, Vadim Allagulov^{1,c,*}, Erik Minibaev^{1,d},
Nikolay Bobrovsky^{2,e}, Renat Kamenov^{2,f}

¹ Omsk State Technical University, 11 Mira Ave., Omsk, 644050, Russian Federation

² National Research University of Electronic Technology - MIET, 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-6454-8310>, tyrin-88@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-8485-1862>, evgenii.krivonos@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0009-0000-5427-7337>, vadim_allgul@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0009-0000-1539-053X>, ericminibaev@yandex.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-9299-2822>, bobrnmm@yandex.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-9181-5704>, renatkamenov@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 November 2025

Revised: 24 November 2025

Accepted: 17 December 2025

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Machining

Heat-resistant alloys

Carbide end mill

Cutting operations

Tool life

Cutting conditions

Surface microgeometry

Surface roughness

Technological heredity

Wavelet analysis

Surface plastic deformation

Funding

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00298-II, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00298/>.

ABSTRACT

Introduction. Modern mechanical engineering is characterized by the increasing application of heat-resistant alloys for critical components in aerospace and defense equipment. The machining of promising molybdenum alloys, such as *Mo-30TiC*, is particularly challenging due to their high heat resistance, abrasiveness, and the anomalous behavior of their mechanical properties at elevated temperatures. Existing technological solutions developed for nickel-based alloys often prove ineffective, highlighting the relevance of research in this area. **Purpose of the work** is to develop rational machining conditions and strategies for the milling of the heat-resistant *Mo-30TiC* alloy, aimed at increasing tool life and ensuring the required surface quality. **Methodology.** Experimental studies were conducted on an *Okuma MB-46BE* machining center using carbide end mills from various manufacturers. The influence of geometric tool parameters (rake angle, cutting edge radius, and presence of a negative land) and cutting conditions (cutting speed, feed rate, depth of cut) on flank wear and surface roughness was investigated. Process monitoring was performed using optical microscopy and surface profilometry. **Results and discussion.** Optimal geometric tool parameters were determined: a rake angle of 0°, a cutting edge radius of 0.5–1 mm, and a negative land width of 0.05 mm. Two distinct machining strategies were developed: a standard cutting strategy ($V_c = 50\text{--}72$ m/min, $f_z = 0.03\text{--}0.04$ mm) for high-quality finishing, and a high-productivity power cutting strategy ($V_c = 12\text{--}17$ m/min, $f_z = 0.08\text{--}0.1$ mm). The *Karcan 99508003* and *CNCINS MS15.Z5.08.19.63.38.R05* end mills demonstrated superior tool life. It was shown that the progression of tool wear leads to an exponential increase in the variance of surface roughness parameters R_a and R_z . **Conclusions.** The proposed set of technological solutions enables effective machining of the *Mo-30TiC* alloy, providing control over tool wear and achieving the specified surface quality. The results of this work are of practical importance for manufacturing enterprises specializing in the machining of difficult-to-cut materials.

For citation: Titov Y.V., Krivonos E.V., Allagulov V.R., Minibaev E.R., Bobrovsky N.M., Kamenov R.U. Influence of processing parameters on tool life in machining the heat-resistant molybdenum-based MoTiC alloy. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 176–192. DOI:10.17212/1994-6309-2026-28.1-176-192. (In Russian).

References

1. Liu Y., Hrechuk A., Agmell M., Ahadi A., Stahl J.-E., Zhou J. FE analysis on the association between tool edge radius and thermal-mechanical load in machining Inconel 718. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 102, pp. 91–96. DOI: 10.1016/j.procir.2021.09.016.

* Corresponding author

Allagulov Vadim R., Assistant

Omsk State Technical University,

11 Mira Ave.,

644050, Omsk, Russian Federation

Tel.: +7 908 102-68-22, e-mail: vadim_allagul@mail.ru

2. Thellaputta G.R., Chandra P.S., Rao C.S.P. Machinability of nickel based superalloys: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4 (2), pp. 3712–3721. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.266.
3. Richards N., Aspinwall D. Use of ceramic tools for machining nickel based alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1989, vol. 29 (4), pp. 575–588. DOI: 10.1016/0890-6955(89)90072-2.
4. Wilson A.S. Formation and effect of topologically close-packed phases in nickel-base superalloys. *Materials Science and Technology*, 2017, vol. 33 (9), pp. 1108–1118. DOI: 10.1080/02670836.2016.1187335.
5. Mahesh K., Philip J.T., Joshi S.N., Kuriachen B. Machinability of Inconel 718: a critical review on the impact of cutting temperatures. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, vol. 36 (7), pp. 753–791. DOI: 10.1080/10426914.2020.1843671.
6. Veiga F., Arizmendi M., Jiménez A., Val A.G.D. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, vol. 204, p. 106524. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106524.
7. Devillez A., Schneider F., Dominiak S., Dudzinski D., Larrouquere D. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. *Wear*, 2007, vol. 262 (7–8), pp. 931–942. DOI: 10.1016/j.wear.2006.10.009.
8. Zhu D., Zhang X., Ding H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 64, pp. 60–77. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001.
9. Hayajneh M.T., Astakhov V.P., Osman M.O.M. An analytical evaluation of the cutting forces in orthogonal cutting using a dynamic model of the shear zone with parallel boundaries. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 82 (1–3), pp. 61–77. DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00021-1.
10. Li Y., Zou B., Shi Z., Huang C., Li L., Liu H., Zhu H., Yao P., Liu J. Wear patterns and mechanisms of sialon ceramic end-milling tool during high speed machining of nickel-based superalloy. *Ceramics International*, 2021, vol. 47 (4), pp. 5690–5698. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.10.155.
11. Huahong M., Wenchao X., Lan W., Ziyuan Z., Zhibiao T., Zhibiao L. Experimental study and modeling of cutting force in high-speed milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Mechanics*, 2025, vol. 41, pp. 55–63. DOI: 10.1093/jom/ufaf006.
12. Zhang L., Liu J., Wu X., Zhuang C. Digital twin-based dynamic prediction of thermomechanical coupling for skiving process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 131 (11), p. 5471–5488. DOI: 10.1007/s00170-022-08908-8.
13. Radu P., Schnakovszky C. A review of proposed models for cutting force prediction in milling parts with low rigidity. *Machines*, 2024, vol. 12 (2), p. 140. DOI: 10.3390/machines12020140.
14. El-Wardany T.I., Mohammed E., Elbestawi M.A. Cutting temperature of ceramic tools in high speed machining of difficult-to-cut materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, vol. 36 (5), pp. 611–634. DOI: 10.1016/0890-6955(95)00043-7.
15. Grzesik W. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. *Wear*, 2008, vol. 265, p. 327. DOI: 10.1016/j.wear.2007.11.001.
16. Tan L., Yao C., Li X., Fan Y., Cui M. Effects of machining parameters on surface integrity when turning Inconel 718. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, vol. 31, p. 4176. DOI: 10.1007/s11665-021-06523-4.
17. Wang R., Yang D., Wang W., Wei F., Lu Y., Li Y. Tool wear in nickel-based superalloy machining: an overview. *Processes*, 2022, vol. 10, p. 2380. DOI: 10.3390/pr10112380.
18. Lindvall R., Bjerke A., Salmasi A., Lenrick F., M'Saoubi R., Ståhl J.-E., Bushlya V. Predicting wear mechanisms of ultra-hard tooling in machining Ti6Al4V by diffusion couples and simulation. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, vol. 43, pp. 291–303. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.10.005.
19. Zhu D., Zhang X., Ding H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 64, pp. 60–77. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001.
20. M'Saoubi R., Axinte D., Soo S.L., Nobel C., Attia H., Kappmeyer G., Engin S., Sim W.-M. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals*, 2015, vol. 64, pp. 557–580. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.05.002.
21. Güven S., Gökkaya H., Sur G., Motorcu A.R. Effects of cutting parameters on tool wear in milling Inconel 625 superalloys with a SiAlON ceramic and the prediction of tool life. *Ceramics International*, 2025, vol. 51, pp. 5646–5658. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.12.012.
22. Ming W., Huang X., Ji M., Xu J., Zou F., Chen M. Analysis of cutting responses of sialon ceramic tools in high-speed milling of FGH96 superalloys. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, pp. 149–156. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.118.

23. Wang G., Wang M., Gao P., Yang B. Online tool wear prediction based on cutting force coefficients identification using neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 136, pp. 5153–5173. DOI: 10.1007/s00170-025-15044-6.
24. Kitagawa T., Kubo A., Maekawa K. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti–6Al–6V–2Sn. *Wear*, 1997, vol. 202, pp. 142–148. DOI: 10.1016/S0043-1648(96)07255-9.
25. Narutaki N., Yamane Y., Hayashi K., Kitagawa T., Uehara K. High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools. *CIRP Annals*, 1993, vol. 42, pp. 103–106. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62402-0.
26. Seleznev A., Pinargote N.W.S., Smirnov A. Ceramic cutting materials and tools suitable for machining high-temperature nickel-based alloys: a review. *Metals*, 2021, vol. 11, p. 1385. DOI: 10.3390/met11091385.
27. Yu W., Ming W., An Q., Chen M. Wear behavior of SiAlON ceramic tool and its effects during high-speed cutting, ceramics international. *Ceramics International*, 2023, vol. 49, pp. 26694–26706. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.05.205.

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>).