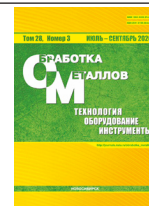




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние продолжительности глубокой криогенной обработки на микроструктуру и трибологические свойства режущих инструментов из WC-Co

Киранкумар Джагтап^{a, *}, Равиндра Деשמукх^b

Кафедра машиностроения, Инженерный колледж им. Джавахарлала Неру Университета MGM, кампус MGM, N-6, CIDCO, г. Чхатрапати Самбхаджингар (Аурангабад), штат Махараштра, 431003, Индия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4088-3544>, k23.jagtap@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0009-0007-5329-9981>, rdeshmukh1@mgmu.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.025.7:669.018.25

История статьи:

Поступила: 15 июня 2026

Рецензирование: 29 июня 2026

Принята к печати: 11 июля 2026

Доступно онлайн: 15 сентября 2026

Ключевые слова:

Твёрдосплавный режущий инструмент WC-Co
Глубокая криогенная обработка
Продолжительность криогенной выдержки
Карбид вольфрама
Износ инструмента
Коэффициент трения
Трибологические характеристики
СЭМ-ЭДС-анализ
Измельчение микроструктуры

АННОТАЦИЯ

Введение. Обработка титана сопряжена с трудностями, обусловленными его низкой теплопроводностью, высокой химической активностью и склонностью к интенсивному тепловыделению в зоне резания, что ускоряет износ инструмента и приводит к его преждевременному разрушению. Режущие инструменты из WC-Co широко применяются в подобных условиях; при этом микроструктурная стабильность, характер распределения связующего кобальта и его износостойкость в значительной мере определяют эксплуатационные характеристики инструмента. В настоящей работе исследовано влияние продолжительности выдержки при глубокой криогенной обработке (ГКО) на трибологические свойства и микроструктуру концевых фрез из WC-Co. **Материалы и методы.** Инструменты из WC-Co изучались в трех состояниях: без обработки, после ГКО в течение 24 ч и после ГКО в течение 36 ч. Криогенную обработку проводили при -196°C с последующим отпускком при 150°C в течение 2 ч. Микроструктуру оценивали методами оптической микроскопии (ОМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) с акцентом на распределение зерен карбида вольфрама, непрерывность кобальтовой связки и пористость. Трибологические испытания выполняли на трибометре Ducom по стандарту ASTM G133; основными измеряемыми параметрами служили потери материала в процессе изнашивания и коэффициент трения. **Результаты и обсуждение.** Образец после 24-часовой ГКО показал наиболее равномерную мелкозернистую структуру WC, более гомогенное распределение кобальтовой связки по сравнению с необработанным образцом и меньшую пористость по сравнению с образцом после 36-часовой обработки. Указанные микроструктурные изменения обеспечили минимальные значения коэффициента трения (0,33) и потери материала в процессе изнашивания (0,138 г). Для необработанного образца коэффициент трения составил 0,40, потеря материала – 0,176 г, что выше соответствующих показателей обработанных образцов. Образец после 36-часовой ГКО занял промежуточное положение (коэффициент трения 0,37, потеря материала 0,157 г), это позволяет предположить снижение положительного эффекта криогенной обработки при увеличении продолжительности выдержки вследствие развития дефектов и микроструктурной неоднородности. **Заключение.** Установлено, что выдержка 24 ч является оптимальным режимом глубокой криогенной обработки для повышения микроструктурной стабильности, снижения трения и увеличения износостойкости режущих инструментов из WC-Co. Полученные результаты могут быть использованы для обоснованного выбора параметров криогенной обработки инструментов из WC-Co, применяемых при обработке труднообрабатываемых материалов, в частности титана.

Для цитирования: Джагтап К.Р., Деשמукх Р.Р. Влияние продолжительности глубокой криогенной обработки на микроструктуру и трибологические свойства режущих инструментов из WC-Co // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 3. – С. 167–184. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-167-184.

Введение

Режущие инструменты из карбида вольфрама – кобальта (WC-Co) широко применяются в процессах механической обработки благодаря высокой твердости, прочности на сжатие, теплостойкости и износостойкости [1–3]. При

обработке труднообрабатываемых материалов режущая кромка подвергается интенсивному трибологическому, механическому и тепловому нагружению, что делает эти инструменты критически важными. Микроструктура изделий из WC-Co, в частности распределение зерен WC, непрерывность связующей кобальтовой фазы, пористость и концентрация дефектов, являются важными факторами, влияющими на работоспособность инструментов из WC-Co [2, 3]. Любая нестабильность этих микроструктурных характеристик может усиливать износ инструмента,

* Corresponding author

Джагтап Киранкумар Р., к.т.н., доцент
Инженерный колледж им. Джавахарлала Неру Университета MGM,
кампус MGM, N-6, CIDCO, г. Чхатрапати Самбхаджингар (Аурангабад),
431003, штат Махараштра, Индия
Тел.: +91-9175591931, e-mail: k23.jagtap@gmail.com

увеличивать трение и сокращать срок службы инструмента при обработке.

Превосходное отношение прочности к весу, коррозионная стойкость и биосовместимость титана и его сплавов обеспечивают их широкое применение в аэрокосмической, биомедицинской, морской и химической промышленности [1, 4–6]. Титан является труднообрабатываемым материалом из-за его низкой теплопроводности, высокой химической активности и высокой теплонакопительности в зоне резания [1, 4, 15]. Эти характеристики способствуют повышению температуры на контактных поверхностях, адгезии между инструментом и заготовкой, быстрому износу по задней поверхности и преждевременному выходу режущего инструмента из строя при обработке. Следовательно, для повышения производительности и качества поверхности при обработке титана необходимо улучшать износостойкость инструмента.

Для повышения работоспособности режущих инструментов применяется ряд методов, включая нанесение покрытий, оптимизацию режимов резания, передовые стратегии охлаждения и постобработку [5, 6, 13]. Среди них глубокая криогенная обработка (ГКО) привлекла большое внимание как дополнительный технологический процесс для твердосплавных режущих инструментов [7, 8]. Обычно ГКО выполняется путем охлаждения инструмента до криогенных температур и выдержки при этой температуре в течение определенного времени, после чего его температура медленно повышается до комнатной. Такая обработка может влиять на распределение остаточных напряжений, стабильность карбидной фазы, поведение кобальтовой связки и однородность микроструктуры [2, 9, 10]. Следовательно, правильно подобранные режимы криогенной обработки позволяют повысить твердость, износостойкость, размерную стабильность и трибологические свойства [16, 18–20].

Применение глубокой криогенной обработки зависит от различных технологических параметров, включая скорость охлаждения, температуру выдержки, продолжительность выдержки, скорость нагрева и отпуск после глубокой криогенной обработки [7, 8, 11]. Среди этих параметров продолжительность выдержки является критической [7, 8, 11]. Недостаточное время вы-

держки может привести к неполной модификации микроструктуры, в то время как чрезмерное время выдержки может вызвать микроструктурную неоднородность, нестабильность связующей фазы и (или) усилить образование дефектов. Следовательно, необходимо определить оптимальное время выдержки, обеспечивающее максимальное повышение износостойкости без переобработки [20–23].

Некоторые исследователи обнаружили, что криогенная обработка твердосплавных инструментов для обработки труднообрабатываемых материалов оказывает положительное влияние [1, 5, 12, 17]. Измельчение микроструктуры, улучшение распределения связки и минимизация дефектов, как правило, коррелируют с повышением износостойкости и срока службы инструмента [10, 19, 20]. Однако в литературе отсутствуют достаточные сравнительные данные о влиянии различной продолжительности выдержки при ГКО на микроструктуру и трибологический отклик концевых фрез из WC-Co [7, 8, 11]. В частности, взаимосвязь между данными оптической микроскопии, РЭМ-ЭДС, коэффициентом трения и износом остается ограниченной [10, 19, 20]. Этот пробел сужает выбор соответствующих параметров криогенной обработки на практике при механической обработке.

В настоящем исследовании для концевых фрез из WC-Co применялись две различные продолжительности выдержки при глубокой криогенной обработке – 24 и 36 ч, после чего фрезы сравнивались с необработанными аналогами. Микроструктурные изменения исследовались методами оптической микроскопии, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии [1, 12, 20]. Трибологическое поведение изучалось с использованием трибометра в соответствии со стандартом ASTM G133. Настоящее исследование сосредоточено на взаимосвязи между наблюдаемыми микроструктурными особенностями, износом и коэффициентом трения, а также определяет оптимальную продолжительность криогенной выдержки.

Некоторые исследователи сообщили об улучшении износостойкости, твердости и трибологических характеристик режущих инструментов из WC-Co после глубокой криогенной обработки [1, 7, 8, 10, 20]. Однако мало исследований посвящено влиянию продолжительности криоген-

ной выдержки на микроструктурные изменения и трибологические свойства концевых фрез из WC-Co [8, 11, 20]. Кроме того, отсутствуют установленные взаимосвязи между распределением зерен, непрерывностью кобальтовой связующей фазы, характеристиками пористости и трибологическими свойствами [10, 19, 20]. Поэтому необходимо экспериментальное исследование для определения влияния времени выдержки на микроструктурную стабильность и характеристики износостойкости.

Цель настоящего исследования – изучение влияния продолжительности выдержки при глубокой криогенной обработке на микроструктуру и трибологические свойства режущих инструментов.

Конкретные задачи исследования:

- проведение глубокой криогенной обработки концевых фрез из WC-Co с выдержкой в течение 24 и 36 ч;

- изучение микроструктурных изменений в необработанных и криогенно обработанных инструментах из WC-Co с использованием оптической микроскопии, РЭМ и ЭДС;

- исследование влияния продолжительности выдержки при ГКО на потери от износа и коэффициент трения в соответствии со стандартом ASTM G133;

- установление корреляций между распределением зерен WC, поведением кобальтовой связующей фазы, пористостью и трибологическими свойствами;

- определение оптимального времени криогенной выдержки для повышения износостойкости и минимизации сил трения в режущих инструментах из WC-Co.

Материалы и методы

Материал заготовки и режущего инструмента

Заготовкой при оценке обрабатываемости служил технически чистый титан (рис. 1). В настоящем исследовании использовались коммерческие твердосплавные концевые фрезы из карбида вольфрама – кобальта (WC-Co) (рис. 2). Режущие инструменты были изготовлены из твердого сплава, который состоит из мелкозернистой матрицы, содержащей около 10 масс. % связующего кобальта и 90 масс. %



Рис. 1. Заготовки из технически чистого титана, использованные в исследовании

Fig. 1. Commercially pure titanium workpiece material used in the study



Рис. 2. Концевые фрезы из WC-Co, применявшиеся в исследовании

Fig. 2. WC-Co end mill cutters used in the investigation

карбида вольфрама. Средний размер зерна WC составлял примерно 0,8...1,5 мкм. Применявшиеся концевые фрезы имели четыре зуба и диаметр 10 мм. Выбранная марка WC-Co, вероятнее всего, используется для обработки титановых сплавов благодаря высокой твердости, хорошей износостойкости и высокой теплостойкости. Все инструменты были приобретены из одной производственной партии для обеспечения одинакового химического состава и микроструктурных характеристик до глубокой криогенной обработки.

Глубокая криогенная обработка

Влияние продолжительности выдержки на трибологические свойства и микроструктуру

режущих инструментов из WC-Co исследовалось с помощью глубокой криогенной обработки (рис. 3). Необработанные инструменты использовались в качестве эталонных образцов. Инструменты, подвергнутые криогенной обработке, выдерживались в жидком азоте при температуре приблизительно -196°C . Цикл криогенной обработки включал в себя контролируемое охлаждение, выдержку, контролируемый нагрев и отпуск. Условия обработки образцов приведены в табл. 1.

Инструменты охлаждались от комнатной температуры до -196°C со средней скоростью охлаждения около $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Затем образцы выдерживались в течение 24 или 36 ч после достижения целевой температуры. После этого образцы нагревались до комнатной температуры с контролируемой скоростью во избежание термического удара. Остаточные напряжения, возникающие в процессе криогенной обработки, впоследствии снимались отпуском при 150°C в течение 2 ч.



Рис. 3. Установка для глубокой криогенной обработки режущего инструмента из WC-Co

Fig. 3. Deep cryogenic treatment setup used for WC-Co cutting tools

Таблица 1

Table 1

Режимы глубокой криогенной обработки режущих инструментов из WC-Co

Deep cryogenic treatment conditions used for WC-Co cutting tools

Обозначение образца / Sample designation	Условие обработки / Treatment condition	Температура выдержки, $^{\circ}\text{C}$ / Soaking temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Продолжительность выдержки, ч / Soaking duration (h)	Условие отпуска / Tempering condition
БО / UT	Без обработки / Untreated	—	0	—
24 ч ГКО / 24 h DCT	Глубокая криогенная обработка / Deep cryogenic treatment	-196	24	150°C в течение 2 ч / 150°C for 2 h
36 ч ГКО / 36 h DCT	Глубокая криогенная обработка / Deep cryogenic treatment	-196	36	150°C в течение 2 ч / 150°C for 2 h

Испытания на изнашивание

Трибологические испытания проводились с использованием трибометра Discot в соответствии со стандартом ASTM G133 (рис. 4). Параметры испытаний приведены в табл. 2. Для испытаний на износ из каждой группы обработки были взяты цилиндрические образцы. Диаметр каждого образца составлял 10 мм, длина — 14 мм. Испытания проводились в условиях

сухого трения. Перед испытаниями образцы очищались и взвешивались на электронных весах. После испытаний образцы снова очищались, высушивались и взвешивались. Разность масс использовалась для определения потери от изнашивания. Коэффициент трения регистрировался во время каждого испытания, и для каждого режима обработки определялся средний коэффициент трения.

Рис. 4. Трибومتر Ducom для испытаний на линейно-возвратное трение скольжения

Fig. 4. Ducom tribometer used for linearly reciprocating sliding wear testing



Таблица 2

Table 2

Параметры испытаний на изнашивание

Wear test parameters

Параметр / Parameter	Значение / Value
Стандарт испытаний / Test standard	ASTM G133
Трибومتر / Tribometer	Трибومتر Ducom / Ducom tribometer
Температура испытания / Test temperature	200 °C / 200°C
Нормальная нагрузка / Normal load	30 Н / 30 N
Продолжительность испытания / Test duration	30 мин / 30 min
Длина хода / Stroke length	30 мм / 30 mm
Частота / Frequency	3...5 Гц / 3...5 Hz
Диаметр образца / Sample diameter	10 мм / 10 mm
Длина образца / Sample length	14 мм / 14 mm
Условие испытания / Test condition	Сухое скольжение / Dry sliding

Потери от изнашивания рассчитывались по следующей формуле:

Потери от изнашивания =

= Начальная масса – Конечная масса.

Для более полной трибологической оценки удельная интенсивность изнашивания может быть рассчитана как

Удельная интенсивность изнашивания =

$$= \Delta V / (F \times L),$$

где ΔV – объемный износ (мм^3); F – приложенная нагрузка (Н); L – путь трения (м).

Объемный износ может быть вычислен из потери массы и плотности материала.

Подготовка образцов для микроструктурных исследований

Образцы инструментов из WC-Co были подготовлены в соответствии с общепринятыми металлографическими методами перед микро-

структурными исследованиями (рис. 5). Каждая концевая фреза была разрезана с помощью прецизионной электроэрозионной резки для получения образца размером около 5 мм от режущей кромки. Образцы заливались в монтажную смолу в холодном состоянии для облегчения шлифовки и полировки.

Залитые образцы шлифовались на абразивных шкурках с последовательно уменьшающейся зернистостью: № 400, 600, 800, 1000 и 1200. После шлифовки образцы полировались алмазной пастой до получения зеркальной поверхности. Затем полированные образцы химически травились реактивом Мураками, состоящим из 10 г феррицианида калия, 10 г гидроксида калия и 100 мл дистиллированной воды. Время травления составляло приблизительно 30 с. После травления образцы очищались в этаноле и затем высушивались в потоке горячего воздуха.

Описанная выше процедура подготовки применялась для выявления зерен карбида вольфрама



a



б



в



г

Рис. 5. Подготовка образцов для микроструктурных исследований:

a – разрезанный образец инструмента WC-Co; *б* – залитый образец; *в* – шлифованный и полированный образец; *г* – протравленный образец, готовый к микроскопическому исследованию

Fig. 5. Sample preparation procedure for microstructural characterization:

a – sectioned WC-Co tool sample; *б* – cold-mounted sample; *в* – ground and polished sample; *г* – etched sample ready for microscopic examination

и кобальтовой связующей фазы. Подготовленные образцы впоследствии исследовались с помощью оптической микроскопии, РЭМ и ЭДС.

Оптическая микроскопия

Оптическая микроскопия использовалась для характеристики общих микроструктурных особенностей необработанных и криогенно обработанных образцов WC-Co. Анализ был сосредоточен на распределении зерен WC, видимой пористости, непрерывности кобальтовой связки и видимых микроструктурных дефектах. Оптические микрофотографии применялись для сравнительной оценки образцов без обработки (БО), 24 ч ГКО и 36 ч ГКО.

Растровая электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия

Растровая электронная микроскопия использовалась для изучения микроструктурной морфологии образцов WC-Co при более высоком увеличении. РЭМ-наблюдения выполнялись

для исследования распределения зерен карбида вольфрама, областей кобальтовой связки, микропустот, пористости и образования дефектов. Энергодисперсионная спектроскопия использовалась для подтверждения элементного состава и распределения фаз в образцах.

РЭМ-ЭДС-анализ был выполнен на образцах БО, 24 ч ГКО и 36 ч ГКО. Необработанный образец выступал в качестве базового состояния. Образец 24 ч ГКО исследовался для оценки влияния криогенной выдержки на измельчение микроструктуры и распределение связки. Образец 36 ч ГКО исследовался для выявления возможной микроструктурной неоднородности или эффектов переобработки.

Результаты и их обсуждение

Результаты ЭДС-анализа элементного состава образцов приведены в табл. 3. Содержание основных элементов (W, C, Co, O) во всех трёх состояниях близко, что свидетельствует о сохра-

Элементный состав образцов WC-Co по данным ЭДС
EDS elemental composition of WC-Co samples

Образец / Sample	W, масс. % / W (wt.%)	C, масс. % / C (wt.%)	Co, масс. % / Co (wt.%)	O, масс. % / O (wt.%)
БО / UT	82,5 / 82.5	7,8 / 7.8	9,1 / 9.1	0,6 / 0.6
24 ч ГКО / 24 h DCT	82,8 / 82.8	7,9 / 7.9	8,8 / 8.8	0,5 / 0.5
36 ч ГКО / 36 h DCT	82,3 / 82.3	7,7 / 7.7	9,3 / 9.3	0,7 / 0.7

нении химического состава твердого сплава при криогенной обработке; наблюдаемые различия находятся в пределах погрешности метода и отражают преимущественно перераспределение фаз, а не изменение среднего состава.

Микроструктурные исследования

Микроструктурные исследования проводились для оценки влияния глубокой криогенной обработки (ГКО) на структуру режущих инструментов из карбида вольфрама – кобальта (WC-Co). Были проанализированы три состояния инструментов: необработанное (БО), после 24-часовой ГКО и после 36-часовой ГКО. Основной целью было исследование изменений размера зерен, распределения кобальтовой связки и пористости, которые напрямую влияют на износостойкость и работоспособность инструмента.

Оптическая микроскопия (ОМ)

Микроструктура подготовленных образцов исследовалась с использованием оптической микроскопии. Наблюдения показали явные различия между тремя состояниями. Необработанный образец демонстрировал сравнительно неравномерное распределение зерен карбида вольфрама и видимую пористость. Образец после 24-часовой ГКО, напротив, показал мелкозернистую и хорошо диспергированную структуру со значительно меньшей пористостью и улучшенной связностью кобальтовой связующей фазы. Образец после 36-часовой ГКО показал некоторое укрупнение зерен и неравномерное распределение, что указывает на начало переобработки.

Необработанный образец (рис. 6, а)

В необработанном образце зерна карбида вольфрама (WC) в матрице кобальтовой (Co)

связки были относительно однородными. Однако красные участки указывали на наличие пористости, включений или областей, обогащенных связкой. Зерна WC были мелкими и хорошо диспергированными, при этом не наблюдалось выраженного аномального роста зерен. Кобальтовая связующая фаза была непрерывной, что свидетельствует о хорошо спеченной структуре. Тем не менее наблюдалась некоторая концентрация дефектов, указывающая на наличие исходных микроструктурных несовершенств.

Образец после 24-часовой ГКО (рис. 6, б)

Образец после 24-часовой криогенной обработки показал значительное улучшение микроструктуры. Зерна WC также были хорошо диспергированы и плотно упакованы, что указывает на их измельчение. Количество красных областей уменьшилось, что свидетельствует о снижении пористости и уменьшении числа дефектов. Кобальтовая связующая фаза стала более однородной и равномерно распределенной, что повышает структурную целостность. Кроме того, улучшилась видимость преобладания зерен WC, что свидетельствует о лучшем распределении фаз в результате криогенной обработки.

Образец после 36-часовой ГКО (рис. 6, в)

Образец после 36-часовой ГКО показал признаки переобработки. Хотя присутствие зерен WC наблюдалось, микроструктура была менее однородной, чем у образца после 24-часовой обработки. Наблюдалось большее количество красных участков (дефектов и пористости), что указывает на ухудшение микроструктурного качества. Кобальтовая связующая фаза оказалась более прерывистой, что свидетельствует о возможном укрупнении зерен связующего.

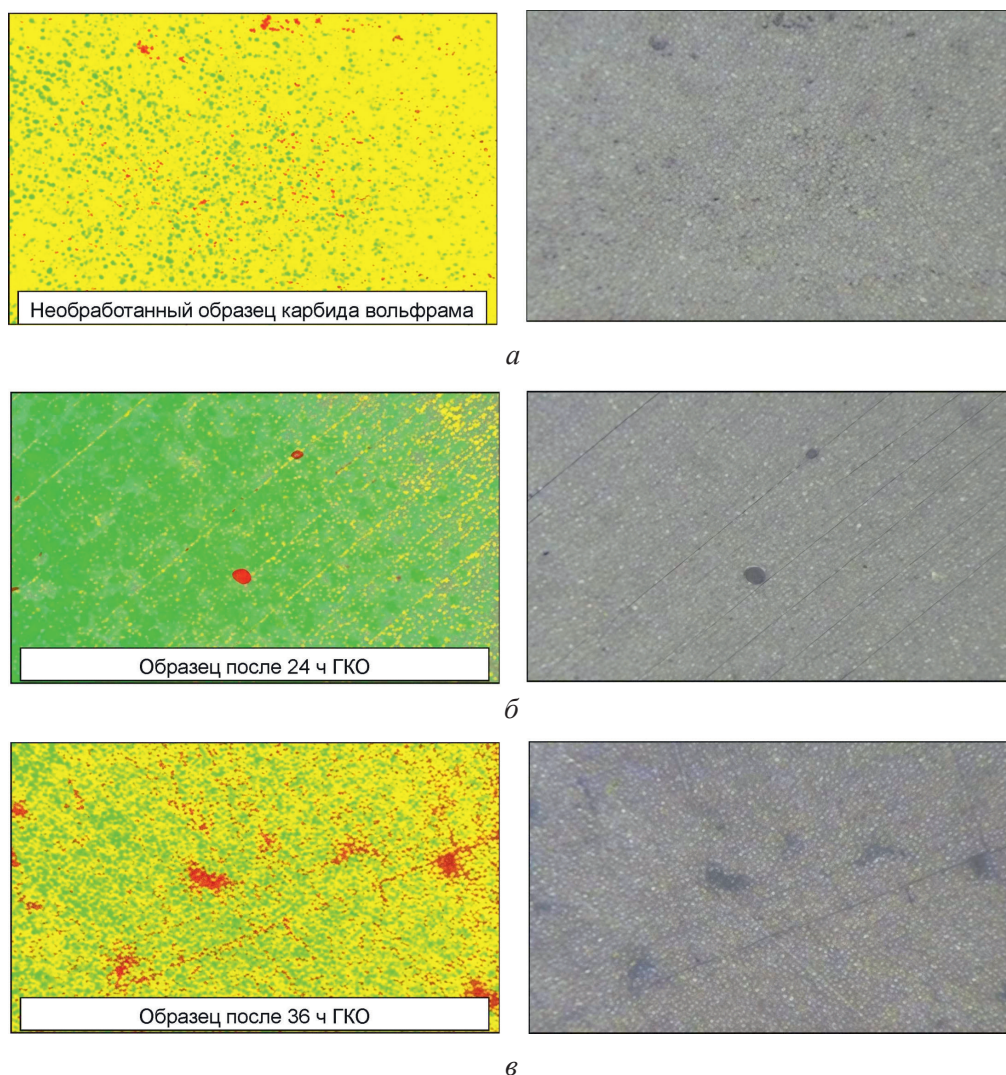


Рис. 6. Оптические микрофотографии режущих инструментов из WC-Co до испытаний:

a – необработанный образец; *б* – образец после 24-часовой ГКО; *в* – образец после 36-часовой ГКО

Fig. 6. Optical microscopy images of WC-Co cutting tools before machining:

a – untreated sample; *б* – 24-hour DCT sample; *в* – 36-hour DCT sample

Растровая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией

Полученные результаты позволяют предположить, что чрезмерная криогенная выдержка приводит к снижению микроструктурной стабильности. Для исследования микроструктурного строения и элементного состава режущих инструментов из карбида вольфрама – кобальта (WC-Co) до механической обработки были выполнены растровая электронная микроскопия (РЭМ) и энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС). Были проанализированы три состояния инструментов: необработанное (БО), после 24-часовой ГКО и после 36-часовой ГКО. Рас-

тровая электронная микроскопия использовалась для получения изображений зерен карбида вольфрама, распределения кобальтовой связки и дефектов с высоким разрешением, тогда как энергодисперсионная спектроскопия – для подтверждения элементного состава и фазовой однородности образцов.

РЭМ-ЭДС-анализ необработанного образца (рис. 7, а)

РЭМ-изображения необработанного образца показали неправильные полигональные зерна WC, плотно упакованные с четкими границами. Фаза карбида вольфрама была представлена более темными областями, тогда как фаза связую-

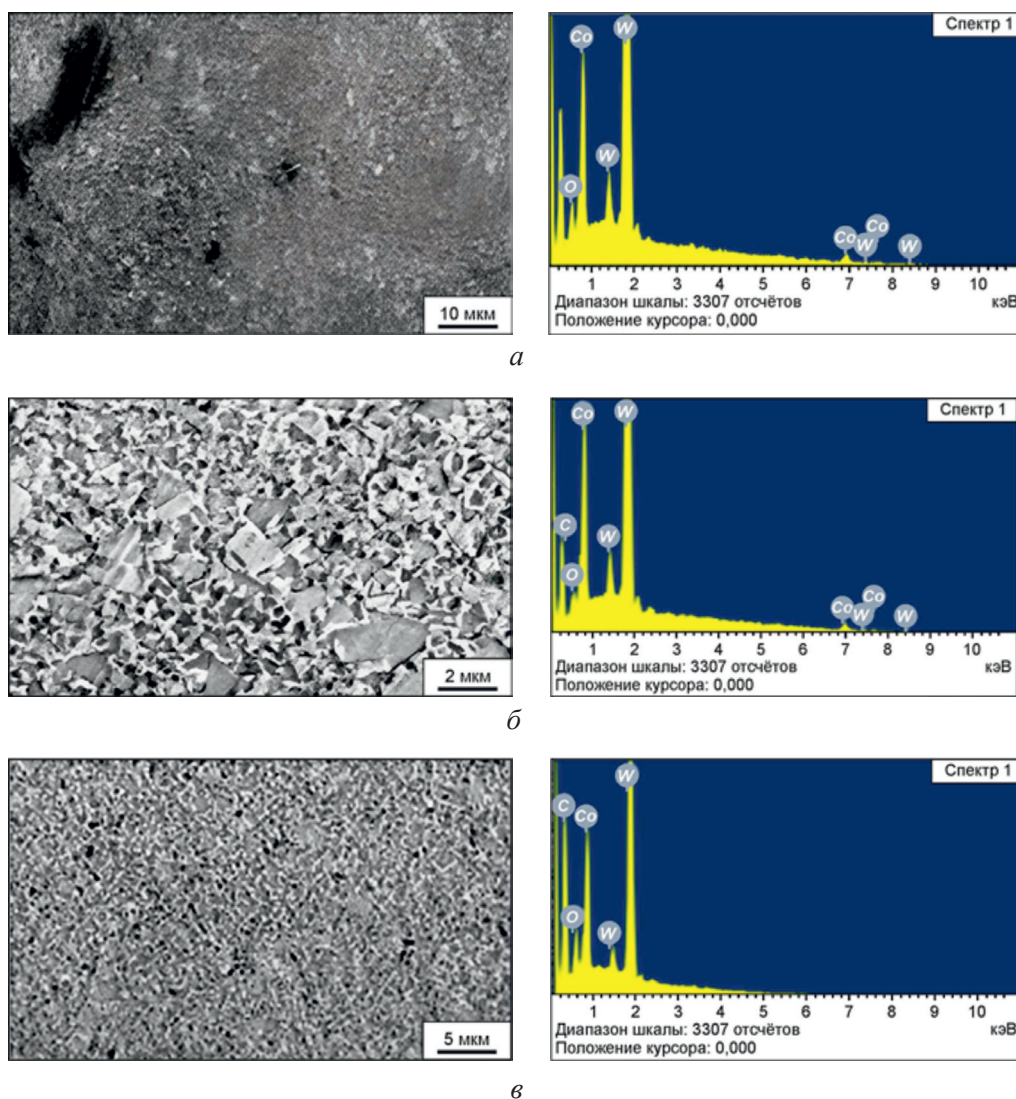


Рис. 7. Микроструктура и результаты РЭМ-ЭДС-анализа образца WC-Co:

а – в необработанном состоянии; б – после 24-часовой ГКО; в – после 36-часовой ГКО

Fig. 7. Microstructure and SEM-EDS analysis results of the WC-Co sample:

а – in the untreated condition; б – after 24 h of DCT treatment; в – after 36 h of DCT treatment

щего кобальта (Co) была представлена светло-серой сеткой вокруг зерен. Связующая фаза была достаточно непрерывной, что свидетельствует о хороших условиях спекания. Однако наблюдались некоторые изолированные темные участки и микропустоты, указывающие на пористость, выкрашивания или области, обедненные связкой. Такие дефекты могут образовываться при полировке или в результате неполного уплотнения при спекании. Общая микроструктура характерна для WC-Co-композиата с мелко-средним зерном и умеренным фазовым контрастом.

Интерпретация

Необработанный образец демонстрирует стабильную и умеренно измельченную микро-

структуру с приемлемым распределением зерен и непрерывностью связующего. Однако пористость и дефекты могут оказывать негативное влияние на износостойкость и механические характеристики, что наблюдалось при механической обработке.

РЭМ-ЭДС-анализ образца после 24-часовой ГКО (рис. 7, б)

РЭМ исследования микроструктуры образца после 24-часовой ГКО показали высокую степень измельчения зерен WC: зерна были мельче, более равномерно распределены и плотнее упакованы, чем в необработанном образце. Границы зерен были более четкими и выраженными, что свидетельствует об усиленном межфазном

взаимодействии и улучшенной микроструктурной стабильности. Кобальтовая связующая фаза демонстрировала более высокую степень однородности и меньшее скопление, что указывает на улучшенное смачивание и перераспределение связи между зернами WC. Кроме того, пористость и дефекты были незначительными, что свидетельствует о снижении внутренних напряжений и повышенной плотности в результате криогенной обработки. ЭДС-анализ подтвердил присутствие вольфрама (W), кобальта (Co) и углерода (C), а также более равномерное распределение элементов, что подтверждает наблюдаемые микроструктурные изменения.

Интерпретация

Образец после 24-часовой ГКО демонстрирует оптимальные микроструктурные характеристики, включая измельчение зерен, равномерное распределение связующего и сниженную пористость. Эти особенности способствуют улучшению структурной целостности, что, как ожидается, повысит износостойкость, снизит трение и увеличит срок службы инструмента.

РЭМ-ЭДС-анализ образца после 36-часовой ГКО (рис. 7, в)

РЭМ-изображения образца после 36-часовой ГКО показали более крупные зерна WC по сравнению с образцом после 24-часовой обработки. Зерна все еще сохраняли свою угловатую морфологию, но некоторые границы зерен были менее четкими в определенных областях, что указывает на начало релаксации границ зерен. Кобальтовая связующая фаза была частично сегрегирована и локализована, что свидетельствует о термически активируемой миграции в течение длительного криогенного воздействия. Кроме того, наблюдалась умеренная пористость и микропустоты, которые были больше, чем в образце после 24-часовой ГКО, но все еще меньше, чем в необработанном состоянии. Элементный состав был подтвержден ЭДС-анализом, выявившим незначительные вариации в распределении фаз, обусловленные сегрегацией связи и микроструктурными дефектами.

Интерпретация

Образец после 36-часовой ГКО демонстрирует признаки переобработки, включая укрупнение зерен, сегрегацию связующей фазы и более высокую плотность дефектов по сравнению с

образцом после 24-часовой ГКО. Хотя он превосходит необработанный образец, ему не хватает оптимального микроструктурного баланса, необходимого для превосходных эксплуатационных характеристик.

РЭМ-ЭДС-анализ наглядно показал, что глубокая криогенная обработка оказывает сильное влияние на микроструктуру режущих инструментов из WC-Co. Образец после 24-часовой ГКО продемонстрировал наиболее желаемое сочетание свойств: измельченная структура зерен, равномерно диспергированная связка и низкая пористость по сравнению с двумя другими состояниями. Образец после 36-часовой ГКО показал снижение положительного эффекта, это указывает на то, что чрезмерное время выдержки приводит к микроструктурной деградации.

Таким образом, по данным оптической (рис. 6) и сканирующей электронной микроскопии (рис. 7) образец, подвергнутый 24-часовой ГКО, характеризуется наиболее однородной и мелкозернистой структурой карбида вольфрама и равномерным распределением кобальтовой связки. Увеличение продолжительности выдержки до 36 ч приводит к менее равномерной микроструктуре и повышению доли дефектов по сравнению с 24-часовой обработкой.

Анализ износа

Режущие инструменты были испытаны с помощью трибометра в условиях сухого трения для оценки износостойкости. До и после испытаний масса каждого образца определялась с использованием прецизионных электронных весов (Kero Laboratory Scale, модель BL-P6D/5003, дискретность 0,001 г). Потери от износа и износостойкость рассчитывались по разности масс. Испытанные образцы имели диаметр 10 мм и длину 14 мм. На рис. 8 показана экспериментальная установка и результаты взвешивания до и после испытания.

Результаты трибологических испытаний показали (табл. 4), что образец после 24-часовой ГКО продемонстрировал наименьшие потери от износа (0,138 г), что соответствует снижению примерно на 21,6 % по сравнению с необработанным образцом. Повышенная износостойкость объясняется измельчением зерен, улучшенным распределением кобальтовой связки и сниженной пористостью. Образец после 36-ча-



Рис. 8. Взвешивание образцов до и после испытаний на изнашивание

Fig. 8. Weighing of specimens before and after wear testing

Таблица 4

Table 4

Результаты испытаний на изнашивание

Wear test results

Образец / Sample	Начальная масса, г / Initial mass (g)	Конечная масса, г / Final mass (g)	Потеря массы, г / Mass loss (g)
Без обработки / Untreated	11,207 / 11.207	11,031 / 11.031	0,176 / 0.176
24 ч ГКО / 24 h DCT	11,000 / 11.000	10,862 / 10.862	0,138 / 0.138
36 ч ГКО / 36 h DCT	11,395 / 11.395	11,238 / 11.238	0,157 / 0.157

совой ГКО показал промежуточные результаты, это позволяет предположить, что более длительные выдержки могут быть нежелательными, так как они снижают положительный эффект, достигаемый при более коротких выдержках.

Улучшенная износостойкость в образце после 24-часовой ГКО объясняется следующими факторами:

- измельченной структурой зерен WC;
- равномерным распределением кобальтовой связки;
- сниженной пористостью и дефектами.

Эти свойства повышают несущую способность и снижают удаление материала при скольжении. Напротив, образец после 36-часовой ГКО показал несколько больший износ, чем образец после 24-часовой обработки, из-за укрупнения зерен и сегрегации связки, что наблюдалось при анализе с помощью растровой электронной микроскопии. Он превосходит необработанный

образец, однако чрезмерное криогенное воздействие приводит к снижению микроструктурной стабильности.

Анализ коэффициента трения (COF)

Данные по коэффициенту трения наглядно показывают (табл. 5), что глубокая криогенная обработка оказала положительное влияние на трибологические характеристики. Состояние после 24-часовой ГКО продемонстрировало наименьший средний коэффициент трения (0,33), что примерно на 17,5 % ниже, чем у необработанного образца (0,40). Это улучшение объясняется микроструктурной гомогенизацией и снижением шероховатости поверхности.

Количественный анализ пористости

Оптические микрофотографии необработанных и криогенно обработанных образцов WC-Co были проанализированы с использованием

Таблица 5

Table 5

Средний коэффициент трения

Average coefficient of friction

Образец / Sample	Средний коэффициент трения / Average coefficient of friction
БО / <i>UT</i>	0,40 / 0,40
24 ч ГКО / 24 h <i>DCT</i>	0,33 / 0,33
36 ч ГКО / 36 h <i>DCT</i>	0,37 / 0,37

программного обеспечения для обработки изображений ImageJ для количественного анализа пористости. Микрофотографии были преобразованы в полутоновые изображения и подвергнуты пороговой сегментации для разделения областей пор и матрицы. Процент пористости определялся как отношение общей площади пор к общей анализируемой площади. Для каждого образца анализировалось несколько микрофотографий, и для повышения достоверности измерений сообщалось среднее значение.

Количественный анализ пористости показал (табл. 6), что глубокая криогенная обработка оказала значительное влияние на снижение пористости. Необработанный образец имел наибольшую пористость – 3,42 %, что указывает на наличие микропустот и несплошностей в матрице WC-Co. Напротив, наименьшее значение пористости – 1,86 % – было зафиксировано для образца после 24-часовой ГКО, что свидетельствует о микроструктурном уплотнении и более равномерном распределении кобальтовой связующей фазы. Промежуточное значение пористости для образца после 36-часовой ГКО (2,47 %) позволяет предположить, что длительная криогенная выдержка может приводить к снижению положительного эффекта по сравнению с 24-часовой выдержкой. Сниженная пористость обе-

спечивает более высокую несущую способность, меньшее количество концентраторов напряжений и лучшую износостойкость, что согласуется с трибологическими результатами настоящего исследования. Таким образом, превосходные характеристики образца после 24-часовой ГКО частично объясняются его меньшей пористостью и лучшей микроструктурной целостностью.

Обсуждение

Наименьшая потеря массы зафиксирована для образца после 24-часовой ГКО (0,138 г), тогда как для необработанного образца она составила 0,176 г, а для образца после 36-часовой ГКО – 0,157 г. Таким образом, криогенная обработка повышает износостойкость инструмента, причём максимальный эффект достигается при выдержке 24 ч.

Средние значения коэффициента трения (табл. 5) согласуются с результатами по износу: наименьший коэффициент трения (0,33) соответствует образцу после 24-часовой ГКО, наибольший (0,40) – необработанному образцу, а образец после 36-часовой ГКО занимает промежуточное положение (0,37). Зависимости коэффициента трения от времени испытания приведены на рис. 9.

Пористость образцов (табл. 6) минимальна после 24-часовой ГКО (1,86 %) и максимальна в необработанном состоянии (3,42 %); при 36-часовой выдержке пористость возрастает до 2,47 %. Это подтверждает, что чрезмерно длительная криогенная выдержка сопровождается развитием дефектов и частичной утратой достигнутого при 24 ч эффекта уплотнения структуры.

Анализ фрикционных характеристик показал, что наименьшее среднее значение коэффициента трения зафиксировано для образца после 24-часовой ГКО (0,33), при этом его трибологи-

Таблица 6

Table 6

Пористость образцов WC-Co

Porosity of WC-Co samples

Образец / Sample	Пористость, % / Porosity (%)
БО / <i>UT</i>	3,42 / 3.42
24 ч ГКО / 24 h <i>DCT</i>	1,86 / 1.86
36 ч ГКО / 36 h <i>DCT</i>	2,47 / 2.47

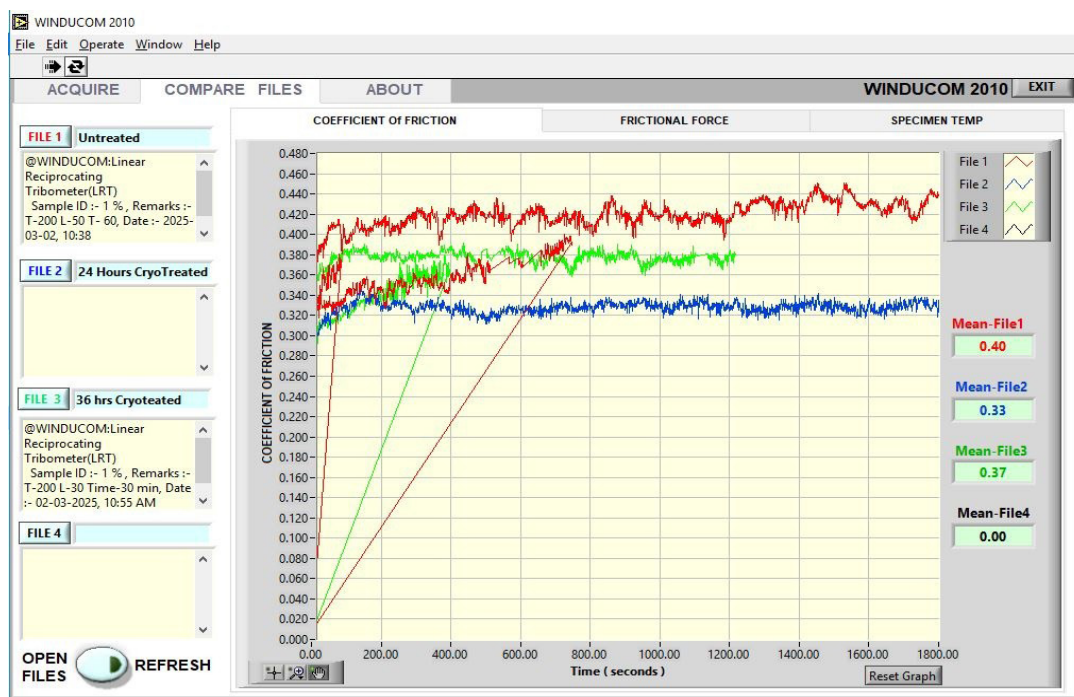


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения от времени для необработанного образца, а также образцов после 24- и 36-часовой глубокой криогенной обработки (ГКО)

Fig. 9. Coefficient of friction vs. time for untreated, 24 h DCT, and 36 h DCT samples

ческое поведение отличалось наибольшей стабильностью на протяжении всего испытания. В противоположность этому необработанный образец продемонстрировал максимальный коэффициент трения (0,40) с выраженными колебаниями, что свидетельствует о нестабильных условиях контактного взаимодействия. Образец после 36-часовой ГКО занял промежуточное положение по фрикционным свойствам (0,37), превосходя необработанный, но уступая образцу с 24-часовой выдержкой. Столь высокие показатели последнего объясняются формированием гладкой и однородной микроструктуры, что согласуется с данными оптической микроскопии и РЭМ.

Улучшенное распределение зёрен карбида вольфрама и кобальтовой связующей фазы способствует минимизации поверхностных неровностей и более равномерному распределению контактных нагрузок, что в совокупности приводит к снижению трения. Напротив, необработанный образец характеризуется повышенным коэффициентом трения вследствие наличия микроструктурных дефектов, пористости и неоднородного распределения зёрен, увеличивающих сопротивление при скольжении. Сегрегация связующей фазы и укрупнение зёрен, наблюдае-

мые после 36-часовой обработки, обуславливают незначительное увеличение коэффициента трения по сравнению с 24-часовым режимом, что указывает на начало процессов переобработки. Кроме того, образец после 24-часовой ГКО демонстрирует стабильность фрикционных свойств во времени, что является критическим фактором для высокопроизводительной механической обработки и снижения тепловыделения в зоне резания.

Уменьшение трения напрямую способствует снижению силового взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой и, как следствие, увеличению стойкости режущего инструмента. Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что глубокая криогенная обработка представляет собой эффективный метод повышения износостойкости и трибологических свойств режущих инструментов из WC-Co, однако её результативность критически зависит от продолжительности выдержки. Оптимальным признан режим 24-часовой ГКО, обеспечивающий наилучший компромисс между измельчением зёрен и структурной стабильностью, тогда как избыточная обработка (36 ч) приводит к снижению положительного эффекта вследствие микроструктурной деградации.

Закключение

В рамках настоящего исследования проведена систематическая оценка влияния продолжительности выдержки при глубокой криогенной обработке (ГКО) на эволюцию микроструктуры и трибологические характеристики концевых фрез из твердого сплава WC-Co.

1. Установлено, что криогенное воздействие приводит к выраженным структурным перестройкам в материале режущих инструментов из WC-Co, проявляющимся в гомогенизации распределения зерен карбида вольфрама, повышении сплошности кобальтовой связующей фазы и уменьшении объемной доли пор.

2. Согласно данным оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии (РЭМ), наиболее равномерная и дисперсная микроструктура зафиксирована для образца, подвергнутого 24-часовой выдержке.

3. Количественные трибологические испытания показали, что образец после 24-часовой выдержки характеризуется минимальными потерями массы от износа (0,138 г), тогда как для необработанного состояния и состояния после 36-часовой ГКО эти значения составили 0,176 г и 0,157 г соответственно, что подтверждает его преимущество в износостойкости.

4. Образец после 24-часовой ГКО продемонстрировал также наименьший коэффициент трения (0,33), что свидетельствует о существенном улучшении трибологических свойств при указанной продолжительности обработки.

5. Увеличение выдержки до 36 часов сопровождается возникновением микроструктурной неоднородности, выраженной в виде локальной сегрегации кобальтовой связки и повышенной плотности дефектов по сравнению с 24-часовым режимом.

6. Полученные данные подтверждают наличие прямой корреляции между степенью структурной измельченности и трибологическими свойствами криогенно обработанного материала режущих инструментов на основе WC-Co.

7. Режим 24-часовой ГКО обеспечивает оптимальный баланс между износостойкостью, антифрикционными свойствами и микроструктурной стабильностью среди всех исследованных вариантов обработки.

Список литературы

1. Effect of cryogenic treatment on the microstructure and the wear behavior of WC-Co end mills for machining of Ti6Al4V titanium alloy / O.N. Celik, A. Sert, H. Gasan, M. Ulutan // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 95 (5–8). – P. 2989–2999. – DOI: 10.1007/S00170-017-1444-1.

2. Effect of deep cryogenic treatment on microstructure, mechanical properties and machining performances of coated carbide tool / B. Li, S. Zhang, T. Zhang, J. Zhang // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 41 (1). – DOI: 10.1007/S40430-018-1533-6.

3. Effects of deep cryogenic treatment on microstructure and properties of WC-11Co cemented carbides with various carbon contents / C.H. Xie, J.W. Huang, Y.F. Tang, L.N. Gu // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2015. – Vol. 25 (9). – P. 3023–3028. – DOI: 10.1016/S1003-6326(15)63929-2.

4. Experimental investigation of tool wear in cryogenically treated insert during end milling of hard Ti alloy / V. Sivalingam, J. Sun, B. Selvam, P.K. Murugasen, B. Yang, S. Waqar // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 41 (2). – DOI: 10.1007/S40430-019-1612-3.

5. Bhople N., Mastud S., Mittal R.K. Metallurgical and machining performance aspects of cryotreated tungsten carbide micro end mill cutters // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2022. – Vol. 237 (3). – P. 492–502. – DOI: 10.1177/09544054221101765.

6. Mastud S., Bhople N., Mittal R.K. Performance analysis of uncoated, TiN coated and cryotreated micro tungsten carbide tools while micromilling of Ti-6Al-4V // International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2022. – Vol. 24 (1–2). – P. 110–131. – DOI: 10.1504/IJMMM.2022.10044694.

7. Kursuncu B. Influence of cryogenic heat treatment soaking period and temperature on performance of sintered carbide cutting tools in milling of Inconel 718 // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2020. – Vol. 92. – DOI: 10.1016/j.jrmhm.2020.105323.

8. Arunkarthikeyan K., Balamurugan K., Rao P.M.V. Studies on cryogenically treated WC-Co insert at different soaking conditions // Materials and Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 35 (5). – P. 545–555. – DOI: 10.1080/10426914.2020.1726945.

9. Varghese V., Ramesh M., Chakradhar D. Influence of deep cryogenic treatment on performance of cemented carbide (WC-Co) inserts during dry end milling of maraging steel // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 37. – P. 242–250. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.11.030.

10. An insight into microstructure and machining performance of deep cryogenically treated cemented carbide inserts / B.N. Sahoo, A. Mohanty, S. Gangopadhyay, K. Vipindas // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 819–831. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.001.

11. *Arunkarthikeyan K., Balamurugan K.* Studies on the impact of soaking time on a cryogenic processed and post-tempered WC–Co insert // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 44. – P. 1692–1699. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.869.

12. Microstructural transformation analysis of cryogenic treated conical rock cutting bits for mining applications / M. Chinnasamy, R. Rathanasamy, S.K. Palaniappan, S.K. Pal // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2022. – Vol. 110. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105995.

13. *Ozbek N.* Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9. – P. 9442–9456. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.03.038.

14. *Mukkoti V.V., Sankaraiah G., Yohan M.* Effect of cryogenic treatment of tungsten carbide tools on cutting force and power consumption in CNC milling process // *Production & Manufacturing Research*. – 2018. – Vol. 6. – P. 149–170. – DOI: 10.1080/21693277.2018.1436011.

15. *Akincioglu S., Gökkaaya H., Uygur İ.* The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 82. – P. 303–314. – DOI: 10.1007/s00170-015-7356-z.

16. Wear behaviour of deep cryogenically treated coated tool during end milling / J.C. Sasi, J. Mathew, A. George, B. Kuriachen, P.B. Dhanish // *SSRN*. – 2024. – DOI: 10.2139/ssrn.4703707.

17. Next-generation tungsten carbide cutting bits through cryogenic treatment technique for superior

rock cutting performance: An experimental study / M.P. Chinnasamy, B. Samanta, R. Kumar, R. Rathanasamy // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2024. – Vol. 125. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106923.

18. Impact of cryogenic treatment on the performance of coated tungsten carbide inserts during machining of EN24 grade alloy steel / R. Prem Chand, T.V.S. Reddy, C. Anjinappa, B. Omprakash, A. Razak, A.W. Wodajo // *Engineering Reports*. – 2024. – Vol. 6. – P. e12839. – DOI: 10.1002/eng2.12839.

19. Dentin bond strength of dental adhesives functionalized with polyhedral oligomeric silsesquioxanes / J. Biermann, C.E. Bieñ, C. Lechte, P. Kanzow, A. Wiegand // *Materials*. – 2024. – Vol. 17 (6). – P. 1321. – DOI: 10.3390/ma17061321.

20. *Premjarunan S., Chindaprasirt P., Chaysuwan D.* Study on the effects of cryogenic treatment on WC–Co cemented carbides // *Metals*. – 2025. – Vol. 15 (3). – P. 297. – DOI: 10.3390/met15030297.

21. Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of ultrafine WC–Co composite / P. Mao, J. Peng, K. Chen, C. Zhou, J. Gao, X. Zhang, X. Xiao, X. Wu, R. Peng // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2026. – Vol. 134. – P. 107429. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2025.107429.

22. *Gao Y., Wang Y., Chen Z.* The effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of coated cemented carbide tools // *Materials Today Communications*. – 2025. – Vol. 42. – P. 110245. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.110245.

23. Microstructural and tribological characterization of cryogenic treated WC–Co cutting bits under different holding times for rock cutting applications / M. Chinnasamy, R. Rathanasamy, S.K. Palaniappan, S.K. Pal, P. Muthuswamy, R.R. Korrayi, M.E. Uddin // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2024. – Vol. 33. – P. 4933–4950. – DOI: 10.1007/s11665-023-08291-9.

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>).

Effect of deep cryogenic treatment duration on microstructure and tribological behaviour of WC-Co cutting tools

Kirankumar Jagtap^{a, *}, Ravindra Deshmukh^b

Department of Mechanical Engineering, Jawaharlal Nehru Engineering College, MGM University, MGM Campus, N-6, CIDCO, Chhatrapati Sambhajanagar (Aurangabad), Maharashtra, 431003, India.

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4088-3544>,  k23.jagtap@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0009-0007-5329-9981>,  rdeshmukh1@mgmu.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 June 2026

Revised: 29 June 2026

Accepted: 11 July 2026

Available online: 15 September 2026

Keywords:

WC-Co cutting tools

Deep cryogenic treatment

Cryogenic soaking duration

Tungsten carbide

Tool wear

Coefficient of friction

Tribological performance

SEM-EDS analysis

Microstructural refinement

ABSTRACT

Introduction. Titanium machining is difficult because of its low thermal conductivity, high chemical affinity, and tendency to generate high cutting-zone temperatures, which accelerate tool wear and premature tool failure. WC-Co cutting tools are common to these applications; however, the degree of microstructural stability, the distribution and wear resistance of the cobalt binder play an important role in the performance. The effect of deep cryogenic treatment (DCT) soaking time on the tribological properties and the microstructure of WC-Co end mill cutting tools is investigated in the present study. **Materials and methods.** WC-Co tools were examined under three conditions: untreated (UT), 24 h DCT, and 36 h DCT. The cryogenic treatment was carried out at -196°C with subsequent slow temperature increase and tempering at 150°C for 2 h. To assess tungsten carbide grain distribution, cobalt binder phase continuity and porosity, the microstructural characteristics were studied by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS). Tribological performance was evaluated using a Ducom tribometer in accordance with ASTM G133, with wear loss and coefficient of friction as the primary measurement parameters. **Results and discussion.** The 24 h DCT sample exhibited the most uniform and fine-grained WC structure, a more uniform distribution of the cobalt binder than the untreated sample, and lower porosity than the 36 h DCT sample. This microstructural enhancement led to the lowest COF of 0.33 and minimum wear loss of 0.138 g. The coefficient of friction for the untreated sample was 0.40, which was higher than that of the treated samples, while the wear loss for the untreated sample was 0.176 g. The 36 h DCT sample exhibited intermediate values of the coefficient of friction (0.37) and wear loss (0.157 g); thus, the beneficial effect of cryogenic treatment may be lessened with prolonged soaking time because of the development of defects and microstructural non-uniformity. **Conclusions.** The 24 h DCT soaking time was determined to be the optimal condition to improve the microstructural stability, friction reduction, and wear resistance of WC-Co cutting tools. The results are helpful for determining the parameters for the cryogenic treatment of WC-Co cutting tools for use in difficult-to-machine materials like titanium.

For citation: Jagtap K.R., Deshmukh R.R. Effect of deep cryogenic treatment duration on microstructure and tribological behaviour of WC-Co cutting tools. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 3, pp. 167–184. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-167-184. (In Russian).

References

1. Celik O.N., Sert A., Gasan H., Ulutan M. Effect of cryogenic treatment on the microstructure and the wear behavior of WC-Co end mills for machining of Ti6Al4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95 (5–8), p. 2989–2999. DOI: 10.1007/S00170-017-1444-1.
2. Li B., Zhang S., Zhang T., Zhang J. Effect of deep cryogenic treatment on microstructure, mechanical properties and machining performances of coated carbide tool. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, vol. 41 (1). DOI: 10.1007/S40430-018-1533-6.
3. Xie C.H., Huang J.W., Tang Y.F., Gu L.N. Effects of deep cryogenic treatment on microstructure and properties of WC-11Co cemented carbides with various carbon contents. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, vol. 25 (9), pp. 3023–3028. DOI: 10.1016/S1003-6326(15)63929-2.

* Corresponding author

Jagtap Kirankumar R., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Jawaharlal Nehru Engineering College, MGM University,
MGM Campus, N-6, CIDCO, Chhatrapati Sambhajanagar (Aurangabad),
431003, Maharashtra, India
Tel: +91-9175591931, e-mail: k23.jagtap@gmail.com



4. Sivalingam V., Sun J., Selvam B., Murugasen P.K., Yang B. Experimental investigation of tool wear in cryogenically treated insert during end milling of hard Ti alloy. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, vol. 41 (2). DOI: 10.1007/S40430-019-1612-3.
5. Bhople N., Mastud S., Mittal R.K. Metallurgical and machining performance aspects of cryotreated tungsten carbide micro end mill cutters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2022, vol. 237 (3), pp. 492–502. DOI: 10.1177/09544054221101765.
6. Mastud S., Bhople N., Mittal R.K. Performance analysis of uncoated, TiN coated and cryotreated micro tungsten carbide tools while micromilling of Ti–6Al–4V. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2022, vol. 24 (1–2), pp. 110–131. DOI: 10.1504/IJMMM.2022.10044694.
7. Kursuncu B. Influence of cryogenic heat treatment soaking period and temperature on performance of sintered carbide cutting tools in milling of Inconel 718. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2020, vol. 92. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105323.
8. Arunkarthikeyan K., Balamurugan K., Rao P.M.V. Studies on cryogenically treated WC–Co insert at different soaking conditions. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, vol. 35 (5), pp. 545–555. DOI: 10.1080/10426914.2020.1726945.
9. Varghese V., Ramesh M., Chakradhar D. Influence of deep cryogenic treatment on performance of cemented carbide (WC–Co) inserts during dry end milling of maraging steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 37, pp. 242–250. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.11.030.
10. Sahoo B.N., Mohanty A., Gangopadhyay S., Vipindas K. An insight into microstructure and machining performance of deep cryogenically treated cemented carbide inserts. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 819–831. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.001.
11. Arunkarthikeyan K., Balamurugan K. Studies on the impact of soaking time on a cryogenic processed and post-tempered WC–Co insert. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 1692–1699. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.869.
12. Chinnasamy M., Rathanasamy R., Palaniappan N., Pal S.K. Microstructural transformation analysis of cryogenic treated conical rock cutting bits for mining applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, vol. 110. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105995.
13. Ozbek N. Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, pp. 9442–9456. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.03.038.
14. Mukkoti V.V., Sankaraiah G., Yohan M. Effect of cryogenic treatment of tungsten carbide tools on cutting force and power consumption in CNC milling process. *Production & Manufacturing Research*, 2018, vol. 6, pp. 149–170. DOI: 10.1080/21693277.2018.1436011.
15. Akıncioğlu S., Gökkaya H., Uygur İ. The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 303–314. DOI: 10.1007/s00170-015-7356-z.
16. Sasi J.C., Mathew J., George A., Kuriachen B., Dhanish P.B. Wear behaviour of deep cryogenically treated coated tool during end milling. *SSRN*, 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4703707.
17. Chinnasamy M., Samanta B., Kumar R., Rathanasamy R. Next-generation tungsten carbide cutting bits through cryogenic treatment technique for superior rock cutting performance: An experimental study. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, vol. 125. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106923.
18. Prem Chand R., Reddy T.V.S., Anjinappa C., Omprakash B., Razak A., Wodajo A.W. Impact of cryogenic treatment on the performance of coated tungsten carbide inserts during machining of EN24 grade alloy steel. *Engineering Reports*, 2024, vol. 6, p. e12839. DOI: 10.1002/eng2.12839.
19. Biermann J., Bieñ C.E., Lechte C., Kanzow P., Wiegand A. Dentin bond strength of dental adhesives functionalized with polyhedral oligomeric silsesquioxanes. *Materials*, 2024, vol. 17 (6), p. 1321. DOI: 10.3390/ma17061321.
20. Premjarunan S., Chindaprasirt P., Chaysuwan D. Study on the effects of cryogenic treatment on WC–Co cemented carbides. *Metals*, 2025, vol. 15 (3), p. 297. DOI: 10.3390/met15030297.
21. Mao P., Peng J., Chen K., Zhou C., Gao J., Zhang X., Xiao X., Wu X., Peng R. Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of ultrafine WC–Co composite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2026, vol. 134, p. 107429. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2025.107429.

22. Gao Y., Wang Y., Chen Z. The effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of coated cemented carbide tools. *Materials Today Communications*, 2025, vol. 42, p. 110245. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.110245.

23. Chinnasamy M., Rathanasamy R., Palaniappan S.K., Pal S.K., Muthuswamy P., Korrayi R.R., Uddin M.E. Microstructural and tribological characterization of cryogenic treated WC–Co cutting bits under different holding times for rock cutting applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 33, pp. 4933–4950. DOI: 10.1007/s11665-023-08291-9.

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>).