



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-257-272>

Повреждаемость режущих инструментов из TiCN-кермета при сухом высокоскоростном точении низколегированной стали AISI 4340

Д.С. Мырзалиев , **К.К. Бернадин** , **Н.Н. Рахымтай** 
О.Б. Сейдуллаева 

*Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова,
Шымкент, Казахстан*

*E mail: darkhan-m7@mail.ru, k_bernadin@mail.ru, saya_rakhumtay@mail.ru,
orynkul_s@mail.ru*

Аннотация. В данной статье рассматривается эффективность применения керамических металлических (керметовых) режущих инструментов на основе TiCN при высокоскоростной сухой обработке сталей. Также присутствует анализ современных исследований, в которых отмечаются высокая износостойкость и стабильность режущих характеристик керметов по сравнению с традиционными инструментами из твёрдого сплава и керамики. Основное внимание уделено термической стойкости, химической инертности и способности сохранять геометрию режущей кромки при повышенных температурах. С использованием программных комплексов Autodesk Nastran и Deform 3D выполнено численное моделирование напряжённо-деформированного состояния и температурного поля в инструменте и обрабатываемой заготовке из стали AISI 4340 при скорости резания 450 м/мин. Максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в инструменте составило 769,2 МПа, температура достигала 1130 °С, что находится в пределах допустимых для TiCN. В зоне резания заготовки зафиксированы температуры до 934 °С и напряжения до 1350 МПа. Полученные результаты подтверждают возможность применения кермет-инструментов для высокоскоростной чистовой обработки. Расчёт износа на основе модели Усуи позволяет оценивать срок службы инструмента с учётом фактических термомеханических нагрузок. Проведённый анализ способствует уточнению представлений о рабочих характеристиках керметов и подтверждает целесообразность их использования в современных технологиях резания металлов.

Ключевые слова: инструменты кермета, TiCN, AISI 4340, сухая токарная обработка, высокоскоростное резание, симуляция резания

Введение

Повышенные требования к производительности современных технологий металлообработки стимулируют поиск новых конструкционных материалов для режущих инструментов, особенно тех, что способны сохранять эффективность в условиях высокоскоростной и сухой резки. На этом фоне особый интерес вызывает использование керметов на основе карбонитрида титана (TiCN), сочетающих в себе положительные свойства как металлов, так и керамики. Эти композиты характеризуются высокой твёрдостью, устойчивостью к термическим и механическим нагрузкам, а также химической инертностью, что делает их перспективными для чистовой обработки легированных сталей без применения охлаждающих жидкостей.

Актуальность представленного исследования обусловлена ограниченным количеством прикладных и экспериментальных работ, направленных на комплексное изучение поведения TiCN-керметов при высокоскоростной сухой обработке сталей, в частности стали марки AISI 4340. Несмотря на растущий интерес к безжидкостной резке в условиях экологических и экономических ограничений, многие аспекты износостойкости и устойчивости керметов по-прежнему остаются недостаточно изученными, что и определяет научную новизну и практическую значимость настоящей работы.

Объектом исследования является процесс высокоскоростной токарной обработки, легированной стали AISI 4340 без использования охлаждающих жидкостей. Предметом выступают особенности износа и повреждаемости режущих пластин из кермета TiCN.

Целью исследования является изучение эксплуатационных характеристик керметных инструментов при сухом резании с помощью моделирования напряжённо-деформированного состояния и температурных полей.

К основным задачам можно отнести:

- анализ научных публикаций по исследуемой тематике;
- проведение численного моделирования процесса резания с использованием программных комплексов;
- интерпретацию полученных результатов с последующей оценкой износа по модели Усуи.

Значимость работы заключается в возможности использовать полученные данные для совершенствования технологии высокоскоростной механической обработки и продления срока службы инструмента.

Обзор литературы

Результаты экспериментальных исследований последних лет указывают на перспективность TiCN-керметов в условиях сухой механической обработки сталей. Так, в работе В. Хи и соавторов выполнено сравнение керамики, карбидов и керметов при точении стали 42CrMo4. Выявлено, что керметные пластины характеризуются наименьшим уровнем износа и наибольшей стабильностью работы даже при изменении режимов резания.

Исследования R. Magalhães и коллег показали, что при точении стали AISI 1045 керметы демонстрируют постепенный абразивный износ, сохраняют геометрию режущей кромки и не способствуют образованию наростов, несмотря на значительные температуры, возникающие в зоне резания.

Обобщённый анализ свойств TiCN-керметов представлен в обзоре M. Elgazzar и соавт., где подчёркиваются высокая твёрдость при нагреве, стойкость к окислению, а также экономическая эффективность их применения. Также отмечено положительное влияние

различных технологических улучшений (нанопокрyтия, градиентные структуры и пр.) на износостойкость инструмента.

В работе T.Yang и коллег анализировались условия износа при точении высокоуглеродистой стали. Результаты показали, что увеличение скорости резания существенно сокращает срок службы керметного инструмента, изменяя преобладающий механизм износа с абразивного на адгезионный. Это подчёркивает важность подбора оптимальных режимов обработки.

Кроме того, A. Das и соавт. провели сравнительный анализ керметов и твердых сплавов при точении стали AISI 4340. Выводы подтвердили более низкое сопротивление резанию и меньшую интенсивность износа у TiCN-керметов, особенно при повышенных подачах.

Несмотря на наличие значительного числа работ, в литературе сохраняется дефицит системных исследований, сочетающих экспериментальные данные и численные симуляции с расчётами износа по эмпирическим моделям, что и обосновывает проведение данной работы.

Керметные режущие инструменты, в особенности на основе карбонитрида титана TiCN, рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным инструментам из карбида вольфрама и керамики в высокопроизводительной обработке металлов. Эти материалы сочетают высокую твердость и износостойкость керамики с ударной вязкостью и теплопроводностью металлов, что делает их особенно подходящими для чистовой и получистовой обработки твёрдых и низколегированных сталей. Рост их популярности обусловлен требованиями промышленности к увеличению производительности, повышению стойкости инструмента и снижению необходимости применения охлаждающих жидкостей в экологически чувствительных условиях или при сухой обработке.

Ряд экспериментальных исследований подчёркивает значительный потенциал керметных инструментов в операциях сухого резания. Так, в исследовании сухого точения легированной стали 42 CrMo₄, В. Ху с соавторами провели сравнение керметов на основе TiCN с традиционными карбидными и керамическими (Si₃N₄) инструментами. Керметные инструменты продемонстрировали наибольший срок службы и наиболее стабильные показатели износа при всех режимах испытаний, характеризуясь постепенным абразивным износом и низкой адгезией стружки. В отличие от керамических и карбидных пластин, которые подвергались выраженному выкрашиванию, выкрашиванию кромок и отслоению покрытий, керметы сохраняли остроту режущих кромок и стабильность рабочих характеристик [1].

Это наблюдение подтвердили R. Magalhães с соавторами при сухом точении стали AISI 1045. Используя непокрытые керметные пластины на основе TiCN, исследователи установили, что скорость резания оказывала незначительное влияние на шероховатость поверхности, в то время как подача существенно влияла на качество поверхности и износ инструмента. Износ по задней поверхности происходил постепенно, носил преимущественно абразивный характер, при этом не наблюдалось существенного образования нароста. Несмотря на повышенные температуры, связанные с сухой обработкой, на детали не выявлено микротрещин или снижения твёрдости, что подтверждает термическую и структурную стабильность керметов в условиях сухого резания [2]. Обзор M. Elgazzar с соавторами подтвердил, что керметы на основе TiCN сочетают горячую твёрдость, износостойкость и экономичность при сухой обработке

низколегированных и закалённых сталей. Эти инструменты устойчивы к окислению и сохраняют режущую способность при температурах выше 900 °С, особенно в высокоскоростной чистовой обработке. Обзор также отметил эффективность наноструктурных покрытий, градиентных структур и текстурирования поверхности в улучшении рабочих характеристик [8].

Т. Yang с соавторами [11] исследовали износ по задней поверхности и стойкость керметного инструмента (Ti,W)C–Mo₂C–Co при сухом точении высокоуглеродистой подшипниковой стали твёрдостью около 62 HRC. Стойкость инструмента была определена при ширине износа VB = 0,3 мм. При скорости резания 180 м/мин срок службы составил примерно 33 минуты. Увеличение скорости до 280 и 450 м/мин сократило срок службы соответственно на ~40% и ~75%, показывая чувствительность инструмента к скорости резания согласно модели Тейлора. На низких скоростях преобладал абразивный износ, на высоких – адгезионный. Переход механизмов износа подчёркивает важность оптимизации скорости резания [11].

А. Das с соавторами [12] выполнили сравнительный анализ обработки закалённой стали AISI 4340 (48 HRC) непокрытыми карбидными пластинами WC-Co и покрытыми керметными пластинами TiN в сухих условиях. Керметы стабильно демонстрировали меньшие силы резания и износ. Наибольшее влияние на износ у керметов оказывала подача, а у карбидных пластин – глубина резания. Результаты подтверждают высокую устойчивость керметов к термомеханическим нагрузкам, особенно при высокоскоростной сухой обработке [12].

Разнообразие экспериментальных данных по прогрессирующему износу, силам резания, шероховатости поверхности и механизмам разрушения керметных инструментов, представленное в исследованиях, формирует надёжную базу для проведения симуляционных исследований с использованием специализированных программных пакетов, таких как Nastran и Deform3D. Представленные результаты демонстрируют, что керметные инструменты на основе TiCN и других карбидных соединений эффективны в различных условиях сухой и устойчивой обработки твёрдых и жаропрочных сплавов. Они способны обеспечивать баланс между долговечностью, качеством обрабатываемой поверхности и производительностью благодаря различным подходам к улучшению структуры материала, включая применение функционально-градиентных конструкций, наноструктурированных покрытий и оптимизации параметров резания. Полученные экспериментальные данные могут использоваться для верификации конечных элементных моделей температурных полей, концентраций напряжений и прогнозирования износа инструмента, способствуя разработке более совершенных и долговечных инструментов.

Методология

Выдвигаемая гипотеза предполагает, что инструменты из TiCN-кермета способны сохранять высокие эксплуатационные характеристики даже при воздействии экстремальных тепловых и механических нагрузок.

Методология исследования основана на применении численных методов моделирования (Autodesk Nastran и Deform 3D), анализе контактных напряжений и температурных полей, а также на эмпирическом моделировании процессов износа. TiCN – керметы известны формированием микроструктуры «ядро–оболочка» во время спекания: керамические зерна имеют ядра, богатые TiC, окруженные оболочками из TiCN-Me

композита (где Me = W, Mo и др. из добавок) [16]. Эта структура, в сочетании с кобальтовой или никелевой связкой, обеспечивает кермету хорошее сочетание твердости и прочности.

В целом, TiCN-керметы более химически инертны по отношению к сталям, чем карбиды WC-Co, поэтому они менее подвержены диффузионному износу (образованию кратеров) и устойчивы к образованию наростов на режущей кромке. Эти свойства делают их идеальными для высокоскоростной чистовой обработки легированных сталей, где они могут достигать отличного качества поверхности при высоких скоростях резания.

Несмотря на свою керамическую составляющую, TiCN-керметы сохраняют умеренную прочность при высокой твердости и жесткости. Основные механические свойства включают: модуль Юнга 400–450 ГПа, твердость 14–16 ГПа по Виккерсу ($\approx$ HRA 90–93), коэффициент трещиностойкости (K_{Ic}): 8–10 МПа для высокотвердых сортов [18].

TiCN-керметы имеют тепловые характеристики, промежуточные между металлами и керамикой. Их теплопроводность значительно ниже, чем у карбида вольфрама из-за фазы TiC/TiN. Например, типичный кермет показывает $\sim 30\text{--}35$ Вт/м·К теплопроводности при комнатной температуре, по сравнению с $\sim 100\text{--}110$ Вт/м·К для WC-Co твердого сплава. Эта низкая теплопроводность означает, что тепло резания склонно оставаться около режущей кромки, что может повысить температуру резания (керметовые вставки часто полагаются на свою горячую твердость и покрытия).

В целом, эти тепловые свойства (низкая теплопроводность, умеренная теплоемкость и среднее расширение) должны учитываться при моделировании и выборе скоростей резания и охлаждения: керметовые инструменты часто работают всухую на высоких скоростях, чтобы тепло уносилось стружкой, а не проводилось в вставку.

Износостойкость является главным преимуществом TiCN-керметов при чистовой обработке. Твердые частицы TiC/TiN обеспечивают превосходную стойкость к абразивному износу и высокую горячую твердость, благодаря чему режущая кромка остается острой даже при высоких температурах. Не менее важна химическая стабильность TiCN, которая уменьшает кратерный износ и сцепление с обрабатываемым материалом – что означает меньший износ по задней поверхности и практически отсутствие наростов при обработке сталей. Это приводит к лучшей чистоте поверхности и более стабильному сроку службы инструмента.

Это показывает, как керметы превосходят при высокоскоростной, легкой чистовой обработке: они обеспечивают длительный срок службы и снижают силы резания (благодаря низкому коэффициенту трения по металлам), если резание не является прерывистым или ударным [24].



Рисунок 1. а) 3D Модель державки; б) 3D Модель режущей пластины

Тем не менее, ограничивающим фактором остается прочность – керметы склонны к скалыванию при высоких нагрузках или вибрациях.

Таблица 1. Используемые показатели для симуляции

Параметр	Значение	Примечания
Инструмент	DCGX-FL	Пластина из кермета, тип FL, R = 0.3 мм,
Материал заготовки	Низколегированная сталь	AISI 4340
Операция	Чистовая обработка	
Сила резания	300	N
Скорость резания	450 м/мин	V _c
Глубина резания	1 мм	t
Подача	0.1 мм/об	f

Этапы исследования

В настоящем исследовании проводится оценка износостойкости и долговечности режущих инструментов из керметов при высокой скорости резания с целью анализа их эксплуатационных характеристик в сравнении с режущими пластинами, изготовленными из других материалов.

Таблица 2. Параметры режущей пластины - DCGX-FL-437 960

Параметр	Значение
Тип	FL
Форма	Ромбическая (55°)
Угол свободного выхода	7° положительный
Точность	G (средняя)
Описанная окружность (IC)	11 мм
Толщина	3 мм
Радиус скругления (R)	0.03 мм
Применение	Тонкое точение
Материал	TiCN

Рекомендуется использовать их для непрерывной чистовой и получистовой обработки легированных сталей, инструментальных сталей, чугуна и т.д., где их превосходная износостойкость дает наилучшие результаты. Покрытия (TiN, TiAlN и др.) на керметах дополнительно увеличивают срок службы инструмента, улучшая износостойкость и устойчивость к окислению, особенно при обработке материалов (например, нержавеющей сталей), которые могут реагировать со связкой.

Исследование основано на результатах компьютерного моделирования процесса резания с использованием программных комплексов Deform 3D и Autodesk Nastran, а также расчетах, выполненных с применением общепринятых аналитических методик и моделей прогнозирования износа инструмента.

Для эксперимента взята режущая пластина из кермета без покрытия марки DIAMETAL.

Пластина DCGX-FL изготовлена из титаново-карбонитридного (TiCN) кермета-композита, состоящего из керамических твердых фаз в металлической связке. Согласно данным Diametal, этот кермет содержит примерно 50% твердых фаз TiC/TiN, около 16% WC (добавленного для улучшения прочности) и около 10–12% металлической связки (Co и/или Ni). Остальная часть включает другие карбиды (такие как Mo₂C, TaC), используемые для улучшения микроструктуры. Данная пластина и подходящая для симуляции державка были смоделированы в программном обеспечении Autodesk Inventor (Рисунок 1).

Таблица 3. Характеристики материала пластины используемые в симуляции

Параметр	Значение	Единица измерения
Плотность (ρ)	7.2×10^{-6}	т/мм ³
Коэффициент демпфирования (GE)	0.02	-
Референсная температура (TREF)	293	К (Кельвин)
Модуль упругости (E)	4.8×10^5	МПа
Модуль сдвига (G)	1.92×10^5	МПа (расчетное)
Коэффициент Пуассона (ν)	0.25	-
Коэффициент теплового расширения (α)	9.5×10^{-6}	К
Предел прочности при растяжении (ST)	1500	МПа
Предел прочности при сжатии (SC)	4000	МПа
Предел прочности при сдвиге (SS)	1200	МПа
Предел текучести (SY)	1200	МПа
Теория отказа	Напряжение фон Мизеса	

Входные данные для симуляции определены на основе заданных условий резания, геометрических параметров державки и характеристик режущей пластины. В таблице 1 представлены параметры симуляции чистовой обработки низколегированной стали AISI 4340, в таблице 2 — геометрические и физико-механические характеристики используемой в симуляции режущей пластины DCGX-FL-437 960, включая угол свободного выхода, радиус скругления и толщину. В первую очередь, для анализа напряженно-деформированного состояния режущего инструмента используется программный комплекс Autodesk Nastran.

Ключевым параметром для оценки прочности и долговечности инструмента является эквивалентное напряжение по критерию фон Мизеса (von Mises stress), поскольку именно этот критерий наиболее точно отражает интенсивность напряжений при сложных нагрузках, характерных для процесса резания – подробные настройки представлены в Таблице 3.

Важным этапом подготовки модели является создание расчетной сетки конечных элементов. В ходе работы была создана специальная адаптированная расчетная сетка с повышенной плотностью элементов в зонах, наиболее подверженных концентрации напряжений (закругления режущих кромок и зоны резания). В этих критических областях

сетка была дополнительно настроена вручную для достижения более точных результатов.

Следующим шагом является применение корректных граничных условий и нагрузок на модель инструмента. Для вычисления напряжений по фон Мизесу необходимо задать действующие на инструмент силы резания. Основная сила, влияющая на интенсивность напряжений, — тангенциальная сила резания (F_t), направленная вдоль скорости резания и обозначаемая в расчетной модели как F_x . Перед расчетом напряжений необходимо сперва определить значение данной силы. Для токарной обработки радиальная и осевая силы составляют долю от тангенциальной силы. Для керметного инструмента при чистовой обработке используем следующие показатели: радиальная сила (F_r) – 90 Н, осевая сила (F_a) – 60 Н. Тангенциальное направление (направление скорости резания, F_t) – 300 Н, Радиальное направление (от заготовки) F_y – 90 Н, Осевое направление (вдоль оси инструмента) F_z – 60 Н.

Результаты и обсуждение

Проведенная численная симуляция в Autodesk Nastran показала, что максимальное эквивалентное напряжение по фон Мизесу, возникающее в инструменте при заданных условиях резания составило 769.2 МПа (Рисунок 2).

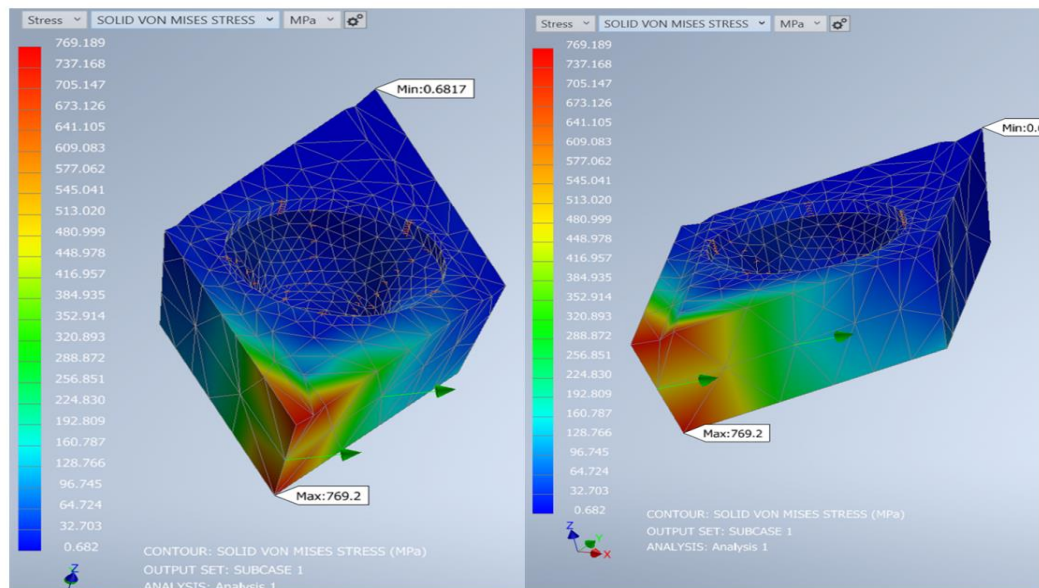


Рисунок 2. Визуализация симуляции в Autodesk Nastran, показывающая распределение напряжения инструмента по фон Мизесу

Данное значение напряжения сосредоточено преимущественно в области режущей кромки пластины, что согласуется с ожидаемыми результатами, так как максимальная нагрузка приходится именно на эту зону. При удалении от режущей кромки наблюдается значительное снижение напряжений, достигая минимальных значений, близких к нулю, в наиболее удаленных от зоны резания участках инструмента. Полученные результаты свидетельствуют о том, что инструмент из керметного материала (TiCN кермет) способен эффективно рассеивать и выдерживать возникающие в процессе резания напряжения, сохраняя свою структурную целостность и работоспособность.

Для оценки поведения обрабатываемого материала (низколегированная сталь AISI 4340) и образующейся в процессе резания стружки была проведена симуляция с

использованием программного комплекса DEFORM-3D. Основными параметрами анализа являлись распределение температур и напряжений в зоне резания.

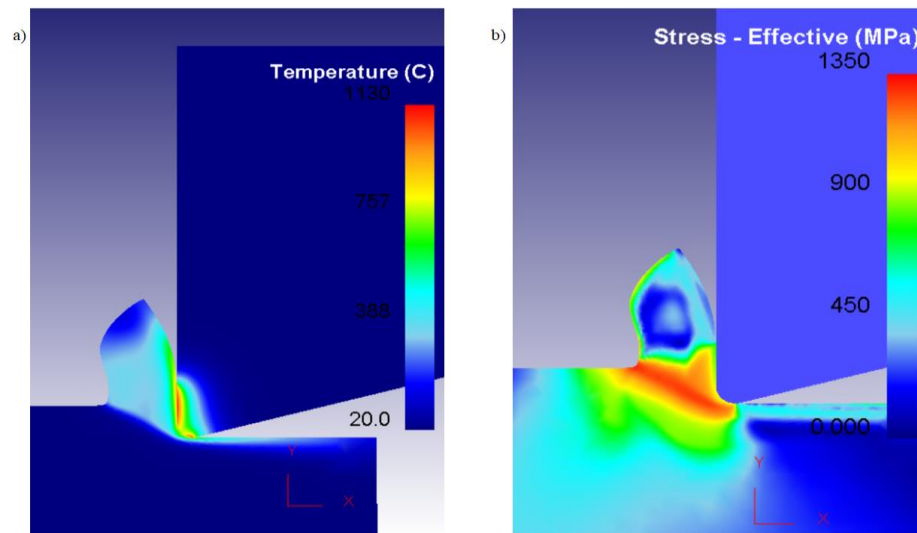


Рисунок 3. Визуализация симуляции в Deform 3D, показывающая показатели температуры и напряжения в зоне контакта для инструмента и заготовки.

а) Температурные показатели зоны контакта; б) Показатели эквивалентного напряжения зоны контакта.

На Рисунке 3 и в Таблице 4, в дополнение к визуализации распределения температуры и напряжения, изображены показатели, полученные в результате численного моделирования: максимальная температура заготовки в зоне контакта, составила 944 °С, режущего инструмента – 1130 °С; максимальное эквивалентное напряжение по фон Мизесу в обрабатываемой детали на заготовке достигло 1350 МПа. Наибольшие значения температуры и напряжений локализуются непосредственно в зоне образования стружки, что является типичным для процесса высокоскоростного резания и подтверждает достоверность полученных результатов.

Таблица 4. Показатели полученные в результате симуляций

Параметр	Температура (°C)	Напряжение (МПа)
Инструмент (DCGX)	1130	769.2
Заготовка (AISI-4340)	934	1350

В результате проведённой симуляции установлено, что при скорости резания 450 м/мин инструмент сохраняет работоспособность, несмотря на сокращённый срок службы вследствие интенсивного износа. Керметы на основе TiCN способны выдерживать температуры до 1200 °С и напряжения до 1700 МПа до начала существенной деградации или разрушения. Аналогично, температурная нагрузка на обрабатываемую заготовку не превышает критических значений: допустимый предел температуры на поверхности составляет порядка 1000 °С, а предел текучести закалённой стали AISI 4340 – 1500 МПа.

Для расчёта предельного времени износа инструмента в данном исследовании мы используем модель Усуи. Модель Усуи (Usui model) — это эмпирическая модель, применяемая для количественной оценки износа режущего инструмента, особенно в

условиях металлорежущих процессов. Данный её вариант позволяет рассчитывать скорость износа на задней поверхности инструмента, основываясь на механических и тепловых нагрузках, действующих в зоне резания.

$$\frac{dVB}{dt} = C \times (\tau \times V)^n \times \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Коэффициент C в модели Усуи является агрегированным параметром, который компенсирует неучтённые эффекты, такие как абразивный и адгезионный износ. В данном случае значение $C=28.0$ косвенно учитывает эти механизмы.

Таблица 5. Обозначения переменных для расчётов по модели Усуи

dVB/dt	Скорость износа по задней поверхности.		Искомое
C	Коэффициент износа (калибруется экспериментально).	28	типовое значение для TiCN-керметов, откалиброванное для скорости в 450 м/мин
τ	Касательное напряжение на контакте инструмента и стружки. В данных условиях 50% от нормального напряжения.	384.6 МПа	-
V	Относительная скорость скольжения (м/с)	7.5 м/с	(из 450 м/мин)
n	Эмпирический показатель степени	1	принятое значение для TiCN
Q	Активационная энергия (Дж/моль)	180000 Дж/моль	типовое значение для TiCN
R	Газовая постоянная	8.314 Дж/моль·К	-
T	Температура на границе резания (К)	1148 К	875°C из симуляции

Расчётное значение C критически зависит от точности определения касательного напряжения и температуры и было получено путём калибровки модели под наблюдаемые скорости износа при сухом резании на высокой скорости (450 м/мин). С учетом этого показателя, мы получаем следующие вычисления:

$$\begin{aligned} \exp\left[\frac{-Q}{RT}\right] &= \exp\left(\frac{-180000}{8.314 \times 1148}\right) = \\ &= \exp(-18.86) = e^{-18.86} = 6.0 \times 10^{-9} \\ \frac{dVB}{dt} &= 28 \times (384.6 \times 7.5)^1 \times 6.0 \times 10^{-9} = \\ &= 28 \times 17307 \times 6.0 \times 10^{-9} = 4.86 \times 10^{-4} \text{ мм/с} \end{aligned}$$

В результате проведённых расчётов была определена скорость износа инструмента по задней поверхности (мм/с).

Зная это значение, можно рассчитать время до достижения критического износа по формуле:

$$t = \frac{V_b}{\frac{dV_b}{dt}},$$

где V_b - средняя ширина износа по задней поверхности. Согласно стандарту ISO 3685, критическим считается значение $V_b = 0,3$ мм.

$$t = \frac{0.3}{4.86 \times 10^{-4}} = 619 \text{ секунд} = 10.3 \text{ минут}$$

Таким образом, при заданных условиях резания инструмент достигает предельного износа за указанное время.

Заключение

В результате проведённого анализа установлено, что режущие пластины из TiCN-кермета являются более предпочтительными для высокоскоростной сухой обработки по сравнению с инструментами, изготовленными из других распространённых материалов, таких как быстрорежущая сталь и твёрдые сплавы. Керметы демонстрируют устойчивую работу даже в условиях интенсивных термических и механических нагрузок, характерных для обработки легированных сталей на повышенных скоростях. Это обусловлено совокупностью эксплуатационных свойств материала, в частности его высокой термостойкостью, стойкостью к износу и химической инертностью. Основные преимущества использования керметов представлены ниже.

1. Высокая термостойкость и износостойкость керметов.

Керметы обладают высокой твердостью при повышенных температурах, что делает их особенно эффективными при высокоскоростной обработке. В отличие от HSS, которая теряет твердость при температурах выше 600 °С, керметы сохраняют свои механические свойства при температурах до 1000 °С и выше. Это позволяет использовать керметы при более высоких скоростях резания, снижая при этом износ инструмента и повышая производительность обработки.

2. Низкий коэффициент трения и улучшенное качество поверхности.

Керметы характеризуются низким коэффициентом трения, что способствует снижению тепловыделения в зоне резания и уменьшению прилипания материала заготовки к инструменту. Это приводит к улучшению качества обрабатываемой поверхности и снижению вероятности образования наростов на режущей кромке. В сравнении с WC-Co, керметы обеспечивают более чистую обработку при высоких скоростях резания, особенно при чистовой обработке сталей.

3. Повышенная стойкость к химическому износу.

Керметы обладают высокой химической инертностью, что снижает вероятность диффузионного износа при обработке труднообрабатываемых материалов. Это особенно важно при сухой обработке, где отсутствует охлаждающая жидкость, и инструмент подвергается воздействию высоких температур и агрессивных сред. В таких условиях керметы демонстрируют лучшую стойкость по сравнению с HSS и WC-Co.

В заключение, использование керметов в качестве режущего инструмента при высокоскоростной обработке обеспечивает ряд преимуществ, включая высокую термостойкость, низкий коэффициент трения, улучшенное качество поверхности и повышенную стойкость к химическому износу. Чрезмерные скорости резания и подачи приводят к ускоренному износу инструмента и снижению качества обработанной поверхности. В связи с этим рекомендуется использовать режимы резания, обеспечивающие увеличенный ресурс инструмента и более высокое качество поверхности, с пониженными скоростями резания (около 90 м/мин) и подачей (меньше 0.1 мм/об) – это позволит продлить время предельного износа до 40 и более минут работы инструмента.

Вклад авторов.

Д.С.Мырзалиев, К.К.Бернадин – разработка концепции статьи; написание текста и/или его критический пересмотр; утверждение финальной версии статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты работы, включая проверку и устранение возможных проблем, связанных с достоверностью данных и целостностью содержания.

О.Б.Сейдуллаева, Н.Н.Рахымтай – значительный вклад в сбор анализ и интерпретация результатов исследования; регистрацию, обработку, анализ, визуализацию и оформление данных; участие в обеспечении финансирования исследования.

Список литературы

1. Xu B, Liu X, Li C, Huang H. Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel: a comparative study. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017;93:2061–9. doi.org/10.1007/s00170-017-0666-6
2. Magalhães R, Santos LF, da Silva CA. Tool wear effect on surface integrity in AISI 1045 steel dry turning. *Materials.* 2022;15(6):2031. doi.org/10.3390/ma15062031
3. Zhou Z, Zhang Y, Liu W. Unraveling the wear mechanism of Ti(C, N)-based cermet tools during high-speed cutting. *SSRN.* 2024. doi.org/10.2139/ssrn.4792020
4. Cui C, Wang J, Li S. Wear mechanisms and crack-healing mechanisms of TiCN-(W,Ti)C-TiSi₂ gradient cermet tool in dry turning of 17-4PH stainless steel. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2025;130:107153. doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107153
5. Li J, Fu S, Wang Y. Study on serrated chip formation and tool wear of cermet tools for milling stainless steel 3Cr13Cu. *Int J Adv Manuf Technol.* 2015;77:461–7. doi.org/10.1007/s00170-014-6476-1
6. Das D, Maity P, Bandyopadhyay A. Experimental investigation of various machining attributes and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with untreated and cryo treated cermet inserts. *Mech Ind.* 2020;21:110. doi.org/10.1051/meca/2019082
7. Lác T, Pánek M, Mucha M. Tool life experiment of coated cermet during nodular cast iron turning. *Int J Adv Manuf Technol.* 2024;133:1129–41. doi.org/10.1007/s00170-024-13741-2
8. Elgazzar M, Ramesh K, Qasim B. A critical review of high-temperature tribology and cutting performance of cermet and ceramic tool materials. *Lubricants.* 2023;11(3):122. doi.org/10.3390/lubricants11030122
9. Sarjana SS, Bencheikh I, Nouari M, Ginting A. Study on cutting performance of cermet tool in turning of hardened alloy steel. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2020;91:105255. doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105255

10. Şirin Ş. Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments. *J Manuf Process.* 2022;76:428–43. doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.029
11. Yang T, Ni L, Xiong J, Shi R, Zheng Q. Flank wear mechanism and tool endurance of (Ti,W)C–Mo₂C–Co cermets during dry turning. *Ceram Int.* 2018;44:8447–55. doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.040
12. Das A, Mukhopadhyay A, Patel SK, Biswal BB. Comparative assessment on machinability aspects of AISI 4340 alloy steel using uncoated carbide and coated cermet inserts during hard turning. *Arab J Sci Eng.* 2016;41:4531–52. doi.org/10.1007/s13369-016-2160-0
13. Zheng G, Li L, Li Z, Gao J, Niu Z. Wear mechanisms of coated tools in high-speed hard turning of high strength steel. *Int J Adv Manuf Technol.* 2018;94:4553–63. doi.org/10.1007/s00170-017-1132-1
14. Reis BC, dos Santos AJ, dos Santos NP, Câmara MA, de Faria PE, Abrão AM. Cutting performance and wear behavior of coated cermet and coated carbide tools when turning AISI 4340 steel. *Int J Adv Manuf Technol.* 2019;105:1655–63. doi.org/10.1007/s00170-019-04392-9
15. Ji W, Zou B, Zhang S, Xing H, Wang Y. Design and fabrication of gradient cermet composite cutting tool, and its cutting performance. *J Alloys Compd.* 2018;732:25–31. doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.187
16. Heydari L, Lietor PF, Corpas-Iglesias FA, Laguna OH. TiCN and WC-based cermets: a review of synthesis, properties and applications in additive manufacturing. *Materials.* 2021;14(22):6786. doi.org/10.3390/ma14226786
17. Qin Y, Zhang Z, Liang W, Tian Y, Ma J. Study on the effect of temperature and pressure environments on the mechanical and electronic properties of titanium carbon nitride ceramics. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2025;17(1):1556–64. doi.org/10.1021/acsami.4c16864
18. Verma V. Sliding wear behavior of TaC-containing Ti(CN)-WC-Ni/Co cermets. *Int J Appl Ceram Technol.* 2016;13:41–8. doi.org/10.1111/ijac.12430
19. Gao J, Song J, Lv M. Microstructure and mechanical properties of TiC_{0.7}N_{0.3}-HfC-WC-Ni-Mo cermet tool materials. *Materials.* 2018;11(6):968. doi.org/10.3390/ma11060968
20. Yan D, Xu G, Yao Z, Liu H, Chen Y. Synergistic effect of SiC particles and whiskers on the microstructures and mechanical properties of TiCN-based cermets. *Materials.* 2022;15(6):2080. doi.org/10.3390/ma15062080
21. Wilzer J, Windmann M, Weber S, Hill H. Thermal conductivity of advanced TiC reinforced metal matrix composites for polymer processing applications. *J Compos Mater.* 2013;49(2):243–50. doi.org/10.1177/0021998313516143
22. Ishida T, Moriguchi H, Ikegaya A. Development of cemented carbide tool of reduced rare metal usage. *SEI Tech Rev.* 2011;(73):55–61.
23. KYOCERA SGS Precision Tools Group. Finishing steel faster: cermet vs. carbide, uncoated vs. coated [Internet]. 2024 Jan [cited 2025 Jun 21]. Available from: <https://www.kyocera-sgstool.com>
24. Jose SA, John M, Menezes PL. Cermet systems: synthesis, properties, and applications. *Ceramics.* 2022;5(2):210–36. doi.org/10.3390/ceramics5020018

D.S. Myrzaliyev, K.K. Bernadin, N.N. Rakhymtay, O.B. Seidullayeva

M.Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan

Damage behavior of TiCN cermet cutting tools during dry high-speed turning of low-alloy steel AISI 4340

Abstract. This paper examines the performance of TiCN-based cermet cutting tools in high-speed dry machining of steels. It also provides an overview of recent research highlighting the superior wear resistance and stable cutting performance of cermets compared to conventional carbide and ceramic tools. Particular attention is given to their thermal stability, chemical inertness, and ability to maintain cutting-edge geometry at elevated temperatures. Numerical simulations of the stress-strain state and thermal field in the cutting tool and AISI 4340 steel workpiece were conducted using Autodesk Nastran and Deform 3D software. At a cutting speed of 450 m/min, the maximum von Mises equivalent stress in the tool reached 769.2 MPa, while the temperature rose to 1130 °C, which remains within the acceptable limits for TiCN-based cermets. In the cutting zone of the workpiece, temperatures up to 934 °C and stresses up to 1350 MPa were observed. The results confirm the feasibility of employing cermet tools for high-speed finishing operations. Tool wear was estimated using the Usui wear model, enabling a realistic assessment of tool life under actual thermomechanical loads. The analysis clarifies the operational characteristics of cermets and supports their application in modern metal cutting technologies.

Keywords: cermet cutting tools, TiCN, AISI 4340, dry turning, high-speed machining, cutting simulation

References

1. Xu B, Liu X, Li C, Huang H. Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel: a comparative study. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017;93:2061–9. doi.org/10.1007/s00170-017-0666-6
2. Magalhães R, Santos LF, da Silva CA. Tool wear effect on surface integrity in AISI 1045 steel dry turning. *Materials.* 2022;15(6):2031. doi.org/10.3390/ma15062031
3. Zhou Z, Zhang Y, Liu W. Unraveling the wear mechanism of Ti(C, N)-based cermet tools during high-speed cutting. *SSRN.* 2024. doi.org/10.2139/ssrn.4792020
4. Cui C, Wang J, Li S. Wear mechanisms and crack-healing mechanisms of TiCN-(W,Ti)C-TiSi₂ gradient cermet tool in dry turning of 17-4PH stainless steel. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2025;130:107153. doi.org/10.1016/j.jirmhm.2025.107153
5. Li J, Fu S, Wang Y. Study on serrated chip formation and tool wear of cermet tools for milling stainless steel 3Cr13Cu. *Int J Adv Manuf Technol.* 2015;77:461–7. doi.org/10.1007/s00170-014-6476-1
6. Das D, Maity P, Bandyopadhyay A. Experimental investigation of various machining attributes and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with untreated and cryo treated cermet inserts. *Mech Ind.* 2020;21:110. doi.org/10.1051/meca/2019082
7. Lánc T, Pánek M, Mucha M. Tool life experiment of coated cermet during nodular cast iron turning. *Int J Adv Manuf Technol.* 2024;133:1129–41. doi.org/10.1007/s00170-024-13741-2
8. Elgazzar M, Ramesh K, Qasim B. A critical review of high-temperature tribology and cutting

- performance of cermet and ceramic tool materials. *Lubricants*. 2023;11(3):122. doi.org/10.3390/lubricants11030122
9. Sarjana SS, Bencheikh I, Nouari M, Ginting A. Study on cutting performance of cermet tool in turning of hardened alloy steel. *Int J Refract Met Hard Mater*. 2020;91:105255. doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105255
 10. Şirin Ş. Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments. *J Manuf Process*. 2022;76:428–43. doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.029
 11. Yang T, Ni L, Xiong J, Shi R, Zheng Q. Flank wear mechanism and tool endurance of (Ti,W)C–Mo₂C–Co cermets during dry turning. *Ceram Int*. 2018;44:8447–55. doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.040
 12. Das A, Mukhopadhyay A, Patel SK, Biswal BB. Comparative assessment on machinability aspects of AISI 4340 alloy steel using uncoated carbide and coated cermet inserts during hard turning. *Arab J Sci Eng*. 2016;41:4531–52. doi.org/10.1007/s13369-016-2160-0
 13. Zheng G, Li L, Li Z, Gao J, Niu Z. Wear mechanisms of coated tools in high-speed hard turning of high strength steel. *Int J Adv Manuf Technol*. 2018;94:4553–63. doi.org/10.1007/s00170-017-1132-1
 14. Reis BC, dos Santos AJ, dos Santos NP, Câmara MA, de Faria PE, Abrão AM. Cutting performance and wear behavior of coated cermet and coated carbide tools when turning AISI 4340 steel. *Int J Adv Manuf Technol*. 2019;105:1655–63. doi.org/10.1007/s00170-019-04392-9
 15. Ji W, Zou B, Zhang S, Xing H, Wang Y. Design and fabrication of gradient cermet composite cutting tool, and its cutting performance. *J Alloys Compd*. 2018;732:25–31. doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.187
 16. Heydari L, Lietor PF, Corpas-Iglesias FA, Laguna OH. TiCN and WC-based cermets: a review of synthesis, properties and applications in additive manufacturing. *Materials*. 2021;14(22):6786. doi.org/10.3390/ma14226786
 17. Qin Y, Zhang Z, Liang W, Tian Y, Ma J. Study on the effect of temperature and pressure environments on the mechanical and electronic properties of titanium carbon nitride ceramics. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2025;17(1):1556–64. doi.org/10.1021/acsami.4c16864
 18. Verma V. Sliding wear behavior of TaC-containing Ti(CN)-WC-Ni/Co cermets. *Int J Appl Ceram Technol*. 2016;13:41–8. doi.org/10.1111/ijac.12430
 19. Gao J, Song J, Lv M. Microstructure and mechanical properties of TiC_{0.7}N_{0.3}-HfC-WC-Ni-Mo cermet tool materials. *Materials*. 2018;11(6):968. doi.org/10.3390/ma11060968
 20. Yan D, Xu G, Yao Z, Liu H, Chen Y. Synergistic effect of SiC particles and whiskers on the microstructures and mechanical properties of TiCN-based cermets. *Materials*. 2022;15(6):2080. doi.org/10.3390/ma15062080
 21. Wilzer J, Windmann M, Weber S, Hill H. Thermal conductivity of advanced TiC reinforced metal matrix composites for polymer processing applications. *J Compos Mater*. 2013;49(2):243–50. doi.org/10.1177/0021998313516143
 22. Ishida T, Moriguchi H, Ikegaya A. Development of cemented carbide tool of reduced rare metal usage. *SEI Tech Rev*. 2011;(73):55–61.
 23. KYOCERA SGS Precision Tools Group. Finishing steel faster: cermet vs. carbide, uncoated vs. coated [Internet]. 2024 Jan [cited 2025 Jun 21]. Available from: <https://www.kyocera->

sgstool.com

24. Jose SA, John M, Menezes PL. Cermet systems: synthesis, properties, and applications. *Ceramics*. 2022;5(2):210–36. doi.org/10.3390/ceramics5020018

Сведени об авторах:

Мырзалиев Дархан Сапарбаевич – к.т.н., доцент, факультет механики и нефтегазового дела, НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Шымкент, 160016, Республика Казахстан.

Бернадин Кафис – магистрант по ОП «Машиностроение», факультет механики и нефтегазового дела, НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Шымкент, 160016, Республика Казахстан

Рахымтай Нурсая – докторантка по ОП «Машиностроение», факультет механики и нефтегазового дела, НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Шымкент, 160016, Республика Казахстан.

Сейдуллаева Орынгул Бахытовна – автор для корреспонденции, докторант по ОП «Машиностроение», факультет механики и нефтегазового дела, НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Шымкент, 160016, Республика Казахстан.

Myrzaliyev Darkhan Saparbaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan

Bernadin Kafis – Master's student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan

Rakhymtay Nursaya – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan

Seidullayeva Oryngul Bakhytkyzy – corresponding author, Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).