



АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛЕЙ

Онискив В. Д. ORCID ID 0000-0002-9455-0446,

Столбов В. Ю. ORCID ID 0000-0003-3259-8660,

Макаров В. Ф., Песин М. В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь,
Российская Федерация, e-mail: valeriy.stolbov@gmail.com*

В статье рассматривается технология радиационной модификации твердосплавного материала режущих пластин для торцевой фрезы с помощью гамма-облучения. Целью исследования является анализ влияния гамма-облучения на износостойкость режущего инструмента при фрезеровании сталей. Измерение стойкости режущего инструмента выполнялось косвенным методом, посредством измерения величины износа при визуальном осмотре на цифровом микроскопе *BM200 LCD*. В качестве исходной заготовки для фрезерования был выбран круглый горячекатаный прокат из стали 40Х с габаритными размерами 200х375 мм. Основанием для выбора материала являлся широкий спектр областей его применения в машиностроении. При фрезеровании режимы резания фиксировались и были назначены согласно рекомендациям завода –изготовителя режущего инструмента по центру диапазона допустимых значений. Измерение износа пластин выполнялось после формообразования новой плоскости на заготовке, для чего производились четыре прохода по 370 мм. Износ измерялся с помощью цифрового микроскопа по задней и передней поверхностям пластины. Приводятся результаты сравнительных испытаний на износостойкость твердосплавных пластин при фрезеровании в состоянии поставки и после их радиационной модификации. Приведен анализ характера износа режущей кромки инструмента до и после его обработки гамма-облучением. Показано, что износостойкость модифицированного режущего инструмента по передней и задней поверхностям в среднем повысилась более чем вдвое.

Ключевые слова: фрезерование, режущий инструмент, износостойкость, гамма-облучение, технология радиационной модификации

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GAMMA IRRADIATION ON THE WEAR RESISTANCE OF CUTTING TOOLS IN MILLING STEELS

Oniskiv V. D. ORCID ID 0000-0002-9455-0446,

Stolbov V. Yu. ORCID ID 0000-0003-3259-8660,

Makarov V. F., Pesin M. B.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Perm National Research Polytechnic University”,
Perm, Russian Federation, e-mail: valeriy.stolbov@gmail.com*

This article examines the technology of radiation modification of carbide material for end mill cutting inserts using gamma irradiation. The aim of the study is to analyze the effect of gamma irradiation on the wear resistance of cutting tools during steel milling. Cutting tool life was measured indirectly by visually inspecting the wear using a *BM200 LCD* digital microscope. A round hot-rolled 40X steel bar with overall dimensions of 200 x 375 mm was selected as the initial workpiece for milling. The material was chosen based on its wide range of applications in mechanical engineering. During milling, cutting conditions were recorded and assigned according to the cutting tool manufacturer's recommendations at the center of the value range. Wear measurements were performed after forming a new plane on the workpiece, for which four passes of 370 mm each were made. Wear was measured using a digital microscope on the back and front surfaces of the insert. The results of comparative wear resistance tests of as-received and radiation-modified carbide inserts during milling are presented. An analysis of the wear patterns of the tool's cutting edge before and after gamma irradiation is provided. It is shown that the wear resistance of the modified cutting tool on both the rake and flank surfaces increases by more than twofold on average.

Keywords: milling, cutting tool, wear resistance, gamma irradiation, radiation modification technology

Введение

Гамма-излучение является одним из видов электромагнитного излучения с самой высокой энергией и самой короткой длиной волны в спектре электромагнитных волн [1, с. 20–25; 2, с. 9–11]. Оно возни-

кает при разрядке ядерных энергетических уровней, то есть при переходе ядер атомов из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Диапазон энергии излучаемых при этом квантов достаточно широк: от 1 кэВ до 10 мэВ,

а соответствующие длины волн изменяются от 10^{-9} до 10^{-13} м. Электрический заряд и масса покоя гамма-квантов имеют нулевые значения, они не взаимодействуют с электрическими и магнитными полями. Этим объясняются выдающиеся параметры проникающей способности гамма-излучения (до 2,5 км в воздухе). Его эффективное сечение взаимодействия много меньше сечения заряженных частиц. Поэтому этот вид облучения используется для процесса модификации толстостенных изделий из металлов и сплавов.

Радиационное воздействие на различные материалы и сплавы, а также на их структуру – предмет многочисленных актуальных исследований. Например, в работах [3–5] рассматриваются вопросы влияния гамма-облучения на полимерные и композиционные материалы, а в работах [6–8] – на свойства металлических сплавов и порошковых смесей. Главная цель подобных экспериментов связана с радиационной модификацией свойств облучаемого материала. Это весьма перспективная и динамично развивающаяся отрасль с ежегодными темпами роста в 7–10 % [9]. Однако остается еще много вопросов, связанных с пониманием и объяснением режимов и механизмов воздействия гамма-квантов на микроструктуру и физико-механические свойства металлов и сплавов, а также возможных приложений гамма-облучения при управлении эксплуатационными характеристиками различных металлических инструментов [10–12]. Поэтому тема исследований является важной и актуальной.

Цель исследования – анализ влияния гамма-облучения на износостойкость режущего инструмента при фрезеровании сталей.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования выступает износостойкость режущих пластин для фрезерования, изготовленных из твердосплавного материала ВК-8 (ZCC-CT YBG202 APMT160408 PDER Китай). Сплав ВК-8 содержит 92 % карбида вольфрама (WC) и 8 % кобальта (Co). Пластины производятся по традиционной технологии порошковой металлургии, которая включает процедуры прессования для формообразования и спекания при температуре порядка 1400 °С для окончательного соединения металлов. Отметим, что исследовались пластины без покрытия.

Ранее выполненные исследования по радиационной модификации резцов для процесса точения [13–15] позволили опре-

делить условия облучения и дозовую нагрузку, обеспечивающие существенный эффект по износостойкости инструмента при токарной обработке. Тем не менее следует отметить, что механическая нагрузка на инструмент в процессе фрезерования имеет выраженный динамический характер, связанный с периодическим воздействием резцов на обрабатываемый металл. Поэтому требуется дополнительное исследование влияния гамма-облучения на характер износа режущего инструмента при фрезеровании. Предварительно резцы были подвергнуты радиационной модификации средними дозами гамма-облучения в открытой воздушной среде на промышленной установке ГУД-300М. В качестве источников излучения использовался радионуклид – ^{60}Co . Условно полагалось, что дозы от 50 до 150 кГр относятся к средним дозам поглощенного облучения.

Испытания на износостойкость модифицированных пластин из твердосплавного сплава ВК-8, закрепленных в торцевой фрезе (рис. 1), проводились на оборудовании ПНИПУ по разработанной в университете методике.



Рис. 1. Вид торцевой фрезы с четырьмя закрепленными режущими пластинами
Примечание: фото авторов

В качестве станочного оборудования для выполнения операции фрезерования был использован универсальный фрезерный станок JET 1452TS DRO (рис. 2).

Выбор оборудования определялся, из соображений универсальности применения и широкого распространения на машиностроительных предприятиях Российской Федерации, а также достаточности технических характеристик. Основные технические параметры оборудования приведены в табл. 1.



Рис. 2. Универсальный фрезерный станок 1452TS DRO
Примечание: фото авторов

Таблица 1

Технические характеристики
станка JET 1452TS DRO

Наименование характеристики	Значение
Частота вращения шпинделя (об/мин)	58–1800
Автоматическая подача по оси X (мм/мин)	15–370
Мощность привода главного движения (кВт)	4
Рабочий ход по оси X (мм)	1000
Рабочий ход по оси Y (мм)	300
Рабочий ход по оси Z (мм)	450
Максимальная нагрузка на стол (кг)	300

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Наиболее распространенным режущим инструментом при выполнении операции фрезерования является торцевая фреза. Торцевое фрезерование позволяет обеспечивать формообразование плоских поверхностей большой протяженности при высокой производительности, так как предоставляется возможность подбора диаметра фрезы равного или превышающего всю ширину обрабатываемой поверхности.

Для выполнения сравнительного анализа стойкости и подтверждения гипотезы

о возможности повышения износостойкости твердосплавного режущего инструмента путем применения гамма-облучения, инструмент был представлен в двух состояниях: первое представляет собой исходное состояние (состояние поставки), второе реализовано при предварительном гамма-облучении по отмеченным выше дозам.

Измерение стойкости режущего инструмента выполнялось посредством измерения величины износа путем визуального осмотра на цифровом микроскопе BM200 LCD и последующего осреднения по числу измерений – h_{cp} . Основные характеристики микроскопа: увеличение в диапазоне 40–1600х, разрешение изображений 1600х1200 dpi и 800х600 dpi.

В качестве исходной заготовки для фрезерования был принят круглый горячекатаный прокат из стали 40Х с габаритными размерами 200х375 мм, диаметр центрального отверстия для транспортировки составлял 50 мм. Важным основанием для такого выбора материала служит широкий спектр областей его применения в машиностроении, номенклатура изготавливаемых из него изделий, а также физико-механические свойства и обрабатываемость резанием.

Основными факторами, влияющими на стойкость режущего инструмента, являются такие параметры, как глубина резания t мм, скорость продольной подачи стола S мм/мин, частота вращения шпинделя n об/мин и скорость резания V м/мин. При условии постоянства отмеченных выше факторов результаты экспериментов можно представить зависимостью средней величины износа h_{cp} (мм) резцов от пути резания L (мм). Следует отметить, что фрезерование выполнялось без использования СОЖ. Численные значения режимов резания представлены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы резания при торцовом фрезеровании стали 40Х

Наименование	Численное значение
Глубина резания t , мм	1,5
Частота вращения шпинделя n , об/мин	1544
Продольная подача стола S_m , мм/мин	135
Подача на зуб фрезы f_z , мм/зуб	0,022
Скорость резания V , м/мин	194
Ширина фрезерования B , мм	40

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.



Рис. 3. Фрезерование плоскости и центральной выборки стальной заготовки
Примечание: фото авторов

Численные значения постоянных режимов резания были назначены согласно рекомендациям завода – изготовителя режущего инструмента по центру диапазона значений.

Отметим, что черновая заготовка в целях формирования плоскости для проведения опытов предварительно подвергалась механической обработке. Исходная площадка представляет собой плоскую поверхность протяженностью $L = 375$ мм и шириной $H = 160$ мм. Эти параметры позволяют совершить четыре прохода фрезы на одной плоскости: два при встречном фрезеровании и два при попутном. Пример выполнения операции фрезерования представлен на рис. 3.

Прежде всего в проведенных исследованиях оценивалась стойкость твердосплавных пластин в исходном состоянии (состоянии поставки). Затем были установлены твердосплавные пластины после проведения процедуры радиационной модификации гамма-облучением.

Известно, что стандарты измерения износа резца регламентируются национальными (ГОСТ 25751-83. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий) и международными документами (ISO 8688-2:1989(en) Tool life in milling – Part2). Согласно им стандартным критерием предельного износа для большинства чистовых операций фрезерования считается $VB_b = 0,3$ мм, а максимальным пределом износа считается $VB_{max} = 0,6$ мм, которые используются авторами при анализе результатов.

В рассматриваемом случае измерение износа пластин выполнялось каждый раз после формообразования новой плоскости на заготовке, то есть после четырех проходов по 370 мм. Измерение износа

проводилось по задней (h_z) и передней (h_p) поверхностям пластин после калибровки цифрового микроскопа по соответствующей шкале. После достижения износа величины $VB_{max} = 0,6$ мм испытания прекращались.

Была введена величина критического износа $h^* = 0,3$ мм по любой из рабочих поверхностей режущего инструмента, которая использовалась для оценивания эффекта повышения износостойкости инструмента после радиационной модификации. Величина критического износа принята, исходя из рекомендаций вышеприведенных стандартов, а также на основании визуальной и органолептической оценки качества поверхностного слоя по параметру шероховатости R_a , мкм. В настоящей работе показатель повышения износостойкости K рассчитывался как отношение длин пути фрез, соответствующих достижению износа $h^* = 0,3$ мм на передней либо задней поверхностях для случаев использования модифицированного и номинального инструментов по формуле

$$K = L_{mod}(h^*) / L_{nom}(h^*). \quad (*)$$

Число независимых пластин было равно 24 м (12 – в состоянии поставки, 12 – после радиационной модификации). Они были разбиты на три партии. Уровень значимости, позволяющий считать результаты испытаний статистически значимым, был принят равным 5 %. Определялись средние значения и среднеквадратические отклонения величины износа пластин по передней и задней кромкам после различного пути резания. Также вычислялись доверительные интервалы статистической обработки результатов испытаний. Часть статистики приведена в следующем разделе статьи.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведения экспериментальных исследований по влиянию длины пути резания L (мм) на износ твердосплавных фрезерных пластин в исходном и радиационно-модифицированном состоянии были получены данные, представленные в табл. 3–5.

Некоторые данные статистической обработки результатов испытаний для трех партий исследованных пластин приведены в табл. 4.

Согласно полученным результатам имеется ожидаемая тенденция на стабильное увеличение величины износа как по передней, так и по задней поверхности режущего инструмента. Графическое изображение результатов опытов представлено

на рис. 4. Здесь представлены линии тренда по средним значениям до достижения величины износа свыше 0,5 мм. Прямоугольником выделена допустимая область износа инструмента.

В табл. 5 представлены результаты измерений износа радиационно-модифицированного режущего инструмента.

В соответствии с полученными результатами можно отметить практически равномерное увеличение износа инструмента по передней поверхности. Вместе с тем износ по задней поверхности режущего инструмента имеет зону повышенного роста, что может говорить о некотором увеличении хрупкости материала пластины. Графическое изображение результатов опытов представлено на рис. 5.

Таблица 3

Результаты измерений величины износа одной партии
твердосплавных пластин в состоянии поставки

1-й контроль износа. Длина пути L = 1480 мм				
	Номер измерения			h _{ср}
	1	2	3	
L	1480 мм			
hп	0	0,08	0,096	0,0587
hз	0,064	0,192	0,188	0,148
2-й контроль износа. Длина пути L = 2960 мм				
	1	2	3	h _{ср}
L	2960 мм			
hп	0,196	0,275	0,288	0,253
hз	0,402	0,4	0,412	0,4047
3-й контроль износа. Длина пути L = 4440 мм.				
	1	2	3	h _{ср}
L	4440 мм			
hп	0,636	0,279	0,639	0,518
hз	0,538	0,456	0,547	0,5137

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 4

Статистические результаты измерений величины износа
твердосплавных пластин в состоянии поставки

Число пластин 12	Длина пути L (мм)					
Число партий 3	1480		2960		4440	
Уровень значимости 0,05 (5 %)	Среднее значение, мм	Доверит. интервал	Среднее значение, мм	Доверит. интервал	Среднее значение, мм	Доверит. интервал
$h_{п}$, мм	0,0581	0,0310–0,0851	0,2508	0,2088–0,2978	0,5179	0,4023–0,6340
$h_{з}$, мм	0,1461	0,1067–0,1854	0,4087	0,3781–0,4392	0,5187	0,4724–0,5638

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

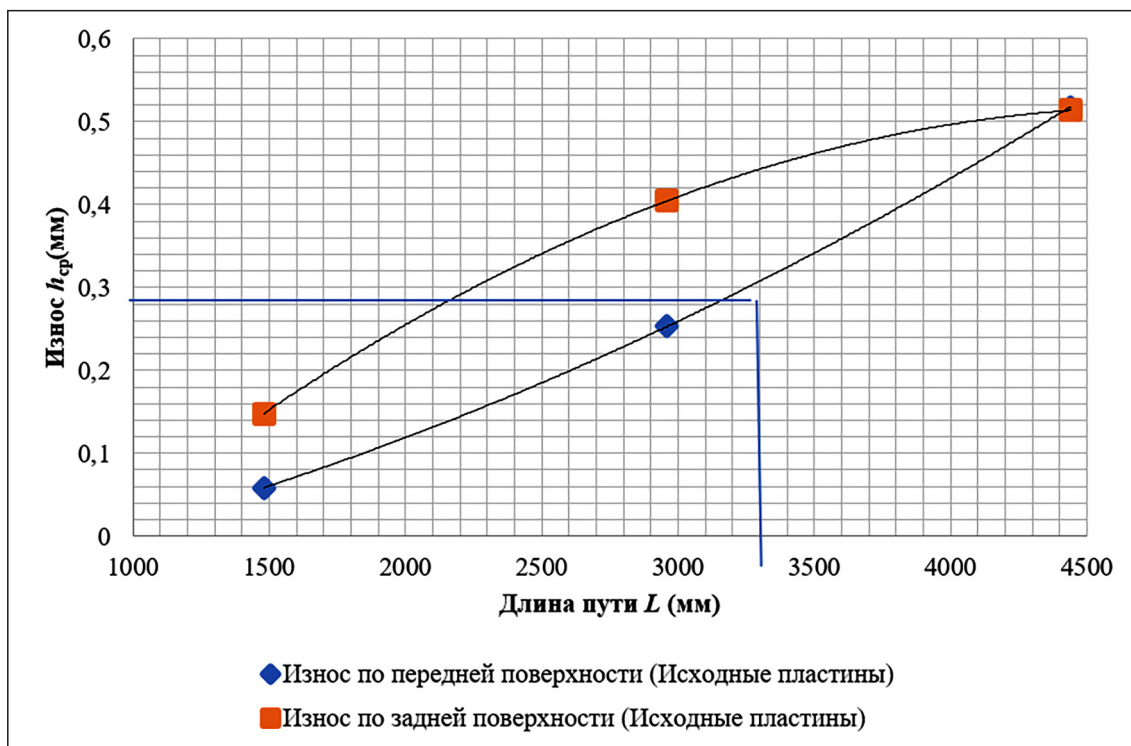


Рис. 4. График влияния величины пути резания L на среднюю величину износа твердосплавных пластин в состоянии поставки
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

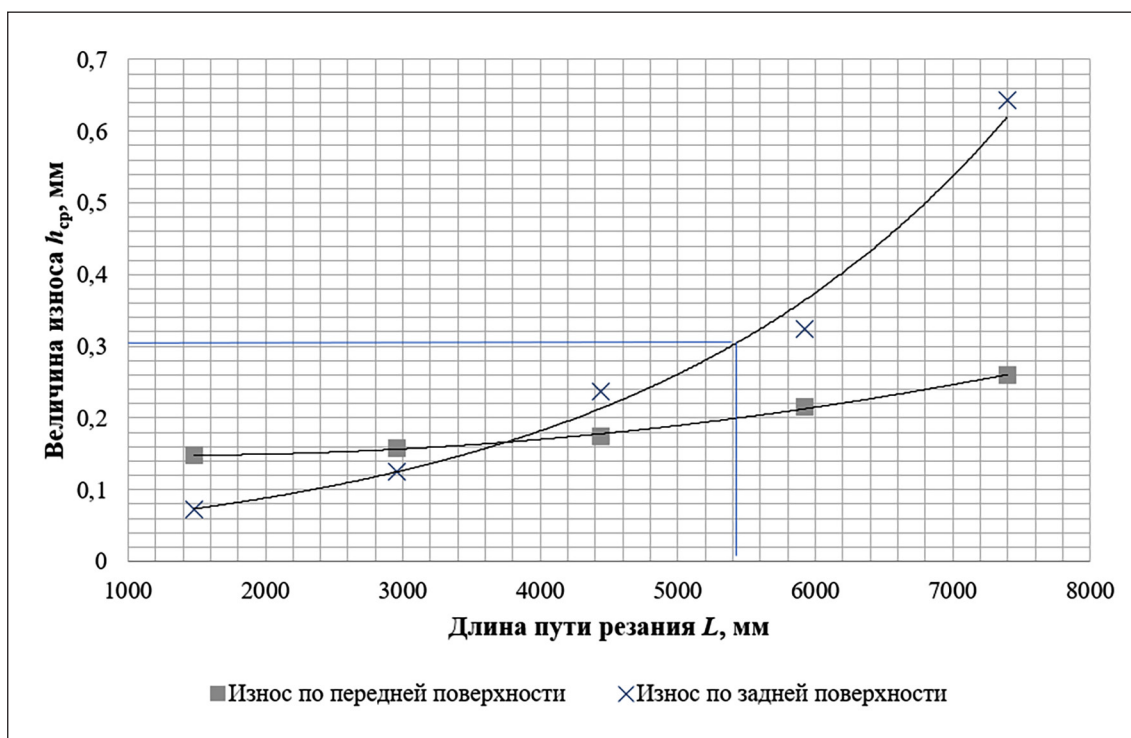


Рис. 5. Влияние пути резания L мм на величину износа твердосплавных пластин в радиационно-модифицированном состоянии
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 5

Результаты измерений величины износа одной партии пластин
в модифицированном состоянии

1-й контроль износа. Длина пути L = 1480 мм				
	Номер измерения			h _{ср}
	1	2	3	
L	1480			
hп	0	0,164	0,28	0,148
hз	0,08	0,056	0,08	0,072
2-й контроль износа. Длина пути L = 2960 мм				
	1	2	3	h _{ср}
L	2960			
hп	0,072	0,13	0,272	0,158
hз	0,096	0,163	0,114	0,1243
3-й контроль износа. Длина пути L = 4440 мм.				
	1	2	3	h _{ср}
L	4440			
hп	0,104	0,141	0,28	0,175
hз	0,16	0,335	0,216	0,237
4-й контроль износа. Длина пути L = 5920 мм				
	1	2	3	h _{ср}
L	5920			
hп	0,144	0,222	0,28	0,2153
hз	0,208	0,359	0,407	0,3247
5-й контроль измерения. Длина пути L = 7400 мм				
	1	2	3	h _{ср}
L	7400			
hп	0,243	0,272	0,265	0,260
hз	0,668	0,647	0,612	0,6423

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

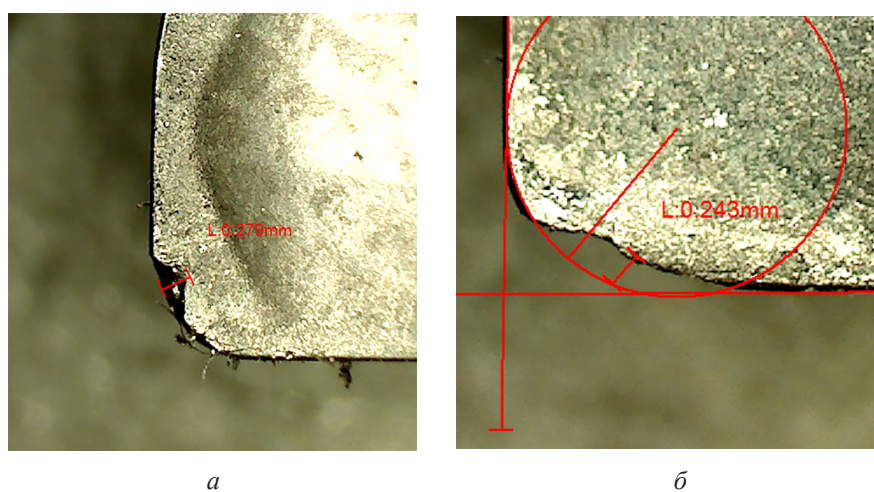


Рис. 6. Износ твердосплавных пластин по передней поверхности:
а – исходное состояние, при пути резания $L = 4440$ мм;
б – модифицированное состояние, при пути резания $L = 7400$ мм
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

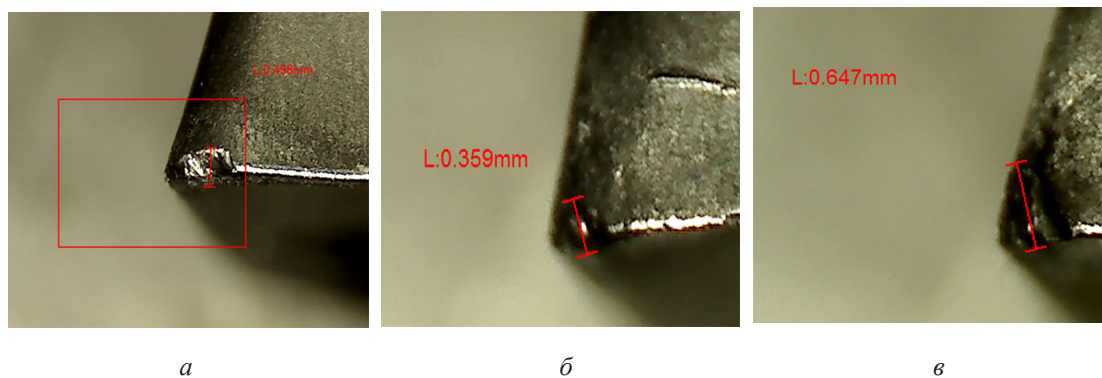


Рис. 7. Износ твердосплавных пластин по задней поверхности:
 а – пластина в состоянии поставки, при пути фрезерования $L = 4400$ мм;
 б – пластина в модифицированном состоянии, при пути фрезерования $L = 5920$ мм;
 в – пластина в модифицированном состоянии, при пути фрезерования $L = 7400$ мм
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

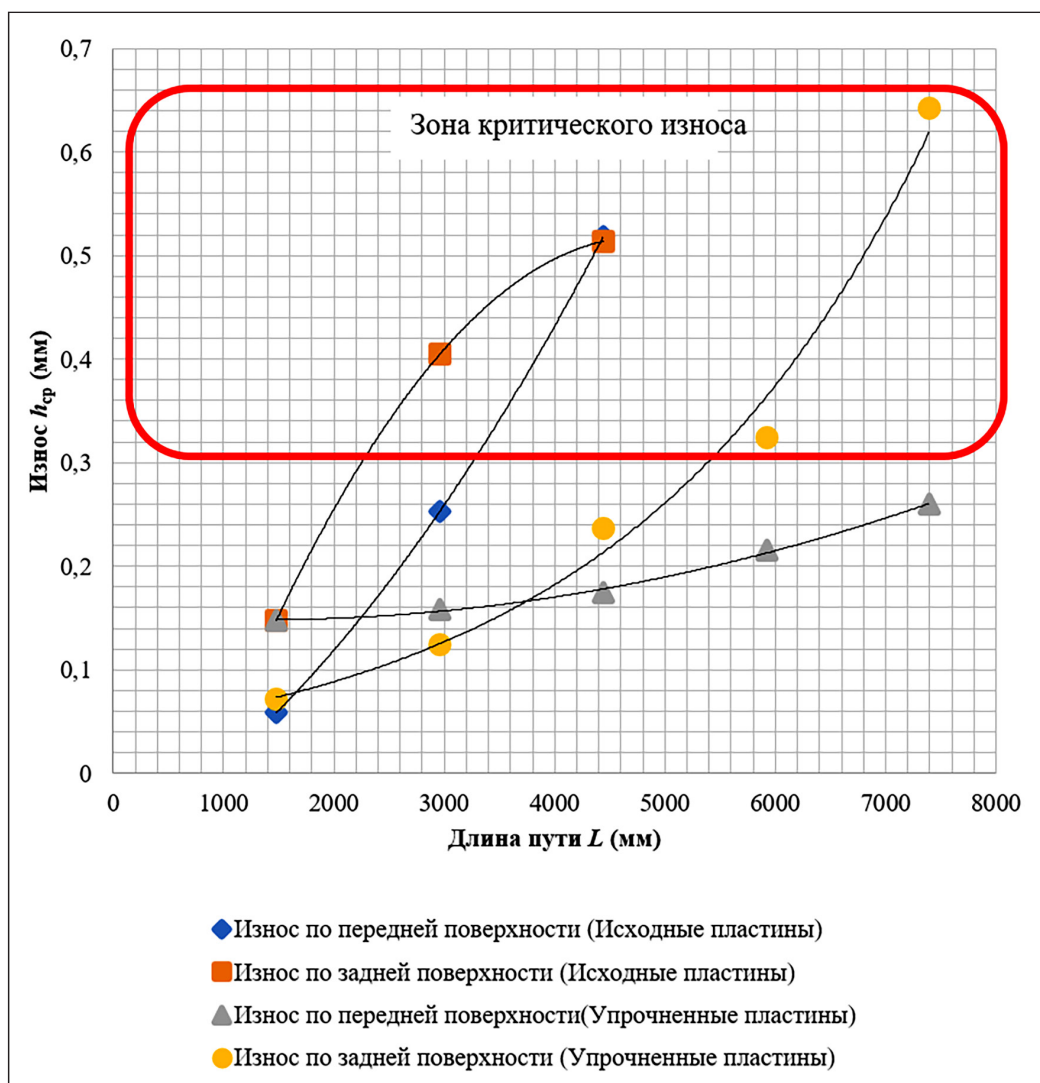


Рис. 8. График зависимости износа режущего инструмента от пути фрезерования до и после его модификации
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

По результатам сравнения типа износа режущего инструмента было отмечено, что критический износ у модифицированных пластин имеет более выраженный характер и проявляется образованием сколов большой площади. Однако образование этих сколов происходит при существенно большем пути обработки. К примеру, износ по передней поверхности, близкий к критическим значениям, у исходных пластин наблюдается на пути, равном 4440 мм. Вместе с тем подобный показатель для модифицированного инструмента достигается только при пути, равном 7200 мм (рис. 6).

Подобную тенденцию можно заметить в сравнительном анализе износа и по задней поверхности. Твердосплавный режущий инструмент в состоянии поставки достигает износа, равного 0,456 мм при пути резания 4440 мм, в то время как модифицированный инструмент имеет износ 0,359 мм при протяженности пути, равного 5920 мм, что позволяет говорить о существенном повышении износостойкости резца (рис. 7).

В целях сопоставления результатов выполненных экспериментальных исследований, на рис. 8 приведены графики влияния пути резания на износ твердосплавного инструмента в двух состояниях: до и после модификации. В соответствии с этими данными можно утверждать, что модифицированный режущий инструмент обладает наибольшим периодом стойкости. Данное преимущество увеличивает длину пути примерно вдвое прочих равных условиях реализации процесса фрезерования. По формуле (*) можно более оценить показатель повышения износостойкости инструмента по передней и задней поверхностям:

$$K_n = 7600/3380 = 2,24;$$

$$K_z = 5700/2300 = 2,48.$$

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по влиянию пути резания при торцевом фрезеровании на износ твердосплавных пластин в исходном и модифицированном состояниях.

2. Выбрано технологическое оборудование и средства технического оснащения сравнительных лабораторных испытаний. Определены методы и алгоритм экспериментальных исследований величины и вида износа режущего инструмента в процессе фрезерования.

3. Показано, что основным типом разрушения твердосплавного инструмента, модифицированного гамма-облучением, является

хрупкое разрушение в виде сколов и выкрашиваний. Однако образование этих сколов происходит при значительно более длинном пути обработки по сравнению с разрушением немодифицированного инструмента. Хрупкий характер разрушения модифицированного инструмента, вероятно, связан с некоторым увеличением твердости материала. В этой связи его использование для грубых обдирочных операций вряд ли целесообразно. Вместе с тем авторы допускают существование режима гамма-облучения, который не приводит к увеличению рисков хрупкого разрушения. Однако его определение требует дальнейших весьма кропотливых исследований

4. Установлено, что повышение износостойкости модифицированного режущего инструмента в среднем по передней поверхности составило 2,24 раза, а по задней поверхности – 2,48 раза.

Таким образом, можно утверждать, что в условиях проведенного лабораторного испытания после радиационной модификации твердосплавных пластин наблюдается тенденция к увеличению пути резания до их критического износа.

Список литературы

1. Вас Г. С. Основы радиационного материаловедения. Металлы и сплавы. М.: Техносфера, 2014. 992 с. ISBN 978-5-94836-400-1.
2. Бондаренко Г. Г. Радиационная физика, структура и прочность твердых тел. М.: Лаборатория знания, 2016. 462 с.
3. Makarevich Yu. L., Oniskiv V. D., Stolbov V. Yu., Gitman I. Effect of Gamma Irradiation on Strength Properties of Basalt Composites // *Mechanics of Composite Materials*. 2022. Vol. 58. Is. 1. P. 43–52. DOI: 10.1007/s11029-022-10010-9.
4. Naikwadi A. T., Sharma B. K., Bhatt K. D., Mahanwar P. A. Gamma Radiation Processed Polymeric Materials for High Performance Applications: A Review // *Frontiers in Chemistry*. 2022. Vol. 10. P. 1–15. DOI: 10.3389/fchem.2022.837111.
5. Онискив В. Д., Столбов В. Ю., Макаревич Ю. Л., Чунаев В. Ю. Некоторые результаты исследования прочности и радиационной стойкости углерод-базальтовых композиционных материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2024. № 3. С. 11–16. DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-3-11-16.
6. Логинова М. В., Яковлев В. И., Филимонов В. Ю., Ситников А. А., Собачкин А. В., Иванов С. Г., Градобоев А. В. Формирование структурных состояний в механоактивированных порошковых смесях Ti+Al, подвергнутых гамма-облучению // *Письма о материалах*. 2018. Т. 8. № 2. С. 129–134. URL: <https://lettersonmaterials.com/en/Readers/Article.aspx?aid=2576> (дата обращения: 15.06.2026). DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-129-134.
7. Шинькулова Н. Н., Шамбулов Н. Б., Татенов А. М., Ертурк С., Шинькулова Г. Н., Мажит Ж. Б., Ашикбаева А. Б. Исследование влияния гамма-облучения на монокристаллы феррита-шпинеля // *Вестник Казахстанско-Британского технического университета*. 2023. Т. 20. № 4. С. 97–108. DOI: 10.55452/1998-6688-2023-20-4-97-108.
8. Логинова М. В., Яковлев В. И., Филимонов В. Ю., Ситников А. А., Собачкин А. В., Иванов С. Г., Градобоев А. В. Формирование структурных состояний в механоактивированных порошковых смесях Ti+Al, подвергнутых гамма-облучению // *Письма о материалах*. 2018. Т. 8. № 2. С. 129–134. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-129-134.

9. Фельдман В. И., Цирлина Г. А. Исследования процессов с участием заряженных частиц на химическом факультете МГУ // Журнал физической химии. 2019. Т. 93. № 11. С. 1603–1619. DOI: 10.1134/S0044453719110104.
10. Алекперов А. С., Дашдемиров А. О., Нагиев Т. Г., Джабаров С. Г. Влияние гамма-облучения на эффект термопереключения монокристалла GeS : Nd // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55. № 7. С. 537–540. DOI: 10.21883/FTR.2021.07.51011.9649.
11. Чернов И. П., Мамонтов А. П. Упорядочение структуры кристаллов ионизирующим излучением (Эффект малых доз ионизирующего излучения) // Известия Томского политехнического университета. 2000. Т. 303. № 1. С. 74–80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uporyadochenie-struktury-kristallov-ioniziruyuschim-izlucheniem-effekt-malyh-doz-ioniziruyushchego-izlucheniya/viewer> (дата обращения: 15.06.2026).
12. Осколкова Т. Н., Глезер А. М. Современное состояние научной проблемы поверхностного упрочнения карбид-вольфрамовых твердых сплавов (обзор) // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 12. С. 980–991. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-980-991.
13. Клопотов А. А., Тимошников Ю. А., Иванов Ю. Ф. Влияние облучения гамма-квантами на структурно-фазовое состояние сплава ВК-8 // Вестник Омского университета. 1999. № 2. С. 29–31. URL: <https://herald-journal.omsu.ru/issues/103/2964.php> (дата обращения: 15.06.2026).
14. Онискив В. Д., Столбов В. Ю., Макаров В. Ф., Песин М. В. Влияние радиационного модифицирования на износостойкость резцов из твердосплавного материала ВК-8 // Трение и износ. 2025. Т. 46. № 5. С. 502–510. DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-502-510.
15. Макаров В. Ф., Песин М. В., Столбов В. Ю., Онискив В. Д., Ран М. А. Повышение износостойкости твердосплавных режущих инструментов путем радиационной модификации микроструктуры твердого сплава. // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 8 (170). С. 31–40. DOI: 10.30987/2223-4608-2025-8-31-40.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Федеральной программы академического лидерства «Приоритет-2030».

Financing: This research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the program Federal Academic Leadership Program «Priority-2030».