
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.9.025.01:519.23

**ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ
НА КОНТАКТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**© 2023 г. Н. С. Азиков¹, Б. М. Бржозовский^{1,*}, Д. В. Крайнев²,
Ж. С. Тихонова^{1,2}, Ю. Л. Чигиринский²¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*²*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия***e-mail: bmsar85@mail.ru*

Поступила в редакцию 17.02.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Представлены результаты сравнительного анализа диффузионных и химических процессов, протекающих при контактном взаимодействии с обрабатываемым материалом обычного режущего инструмента и инструмента с модифицированным воздействием газового разряда низкотемпературной плазмы поверхностным слоем рабочей части.

Ключевые слова: модифицированный режущий инструмент, контактные взаимодействия, диффузионные процессы, химические процессы, теплопроводность

DOI: 10.31857/S0235711923040041, EDN: XUVUZU

Материалы исследований, выполненных по проблеме повышения долговечности металлорежущего инструмента за счет модификации его рабочей части воздействием газового разряда низкотемпературной плазмы, позволили констатировать [1, 2], что модификация приводит к изменению механизма контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом. Изменение связано с перемещением при взаимодействии микрообъемов инструментального материала в направлении от режущей кромки частично на вспомогательную заднюю поверхность при ее контакте с заготовкой, частично в направлении от режущей кромки по передней поверхности при ее контакте со стружкой. Результатом перемещения становится: 1) формирование обтекаемой формы краев режущей кромки в контактной зоне, без явных признаков разрушения; 2) повышение устойчивости рабочей части к образованию дефектов на рабочих поверхностях.

В совокупности это приводит к повышению в различной степени ресурса инструмента и стабилизации качества обработанной поверхности (по параметрам шероховатости), способствующим, как следствие, повышению, с одной стороны, производительности, с другой стороны надежности технологических процессов механической обработки резанием. В связи с этим представляется целесообразным раскрытие основных закономерностей контактного взаимодействия модифицированного инструмента с обрабатываемым материалом.

Подход к исследованию включал изучение диффузионных и химических процессов при контактном взаимодействии. Объектами исследования стали 30 обычных и 30 модифицированных твердосплавных пластин с многослойным CVD-покрытием фирмы Sandvik Coromant (Швеция). По результатам модификации микротвердость поверх-

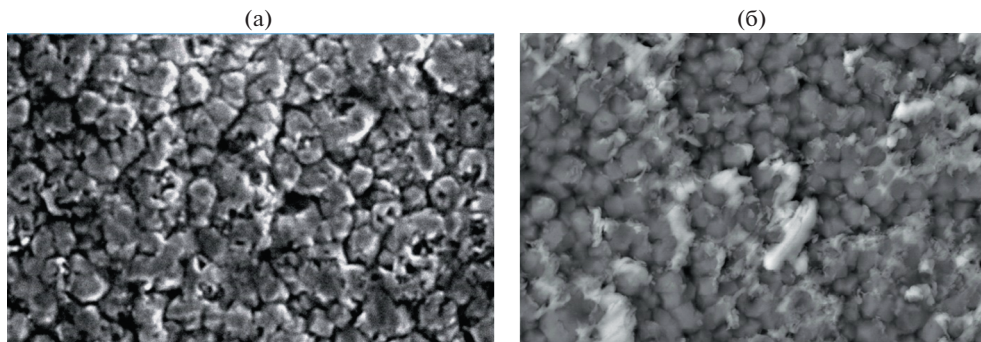


Рис. 1. Морфология поверхности обычной (а) и модифицированной (б) пластины.

ностного слоя рабочей части пластин повысилась, в среднем, в 1.85 раза, а его плотность, в среднем, в 2.78 раза. Пластины прошли стойкостные испытания при точении материалов групп обрабатываемости “Р” и “М” с различными сочетаниями скорости резания и подачи. Перед испытаниями была проведена оценка режущих свойств пластин измерением термоЭДС пробного рабочего хода E , которая является комплексным показателем электро- и теплофизических свойств различных материалов [3]. У модифицированных пластин зафиксировано сокращение разброса значений термоЭДС, в среднем, в 1.88 раза.

Исследование проводилось методами оптической и электронной микроскопии рабочих поверхностей пластин с использованием FIB микроскопа FEI VERSA 3D, а также химико-спектрального анализа поперечных срезов режущего клина, полученных методом локального жесткого ионно-лучевого травления.

Результаты и обсуждение. Изучение и сравнение поверхностей модифицированных пластин с поверхностями обычных пластин позволило установить их характерное отличие, которое заключается в более сглаженном микрорельефе (рис. 1), что обеспечивает в процессе контактного взаимодействия уменьшение результирующего коэффициента трения и, как следствие, стабилизацию микрогеометрии поверхности обрабатываемой заготовки.

Возникновение и развитие фаски износа затрагивает как главную, так и вспомогательную задние поверхности. Однако по сравнению с обычными у модифицированных пластин в большинстве случаев рост фаски износа проходил без явных следов выкрашивания на режущей кромке, что означает уменьшение интенсивности адгезионно-усталостных процессов.

Спектральный анализ выявил истирание по задней поверхности слоев покрытия TiN (рис. 2а) с обнажением внутренних слоев Al_2O_3 и Ti(CN) (рис. 2б).

В процессе резания происходила деформация режущего клина, начинающаяся до момента прорыва покрытия (рис. 3а) и прогрессирующая параллельно росту фаски износа по задней поверхности (рис. 3б).

В ряде случаев наблюдалось образование проточин на задней поверхности. При этом наибольшие по величине проточины располагались по краю фаски износа.

На рабочей поверхности пластин зафиксировано присутствие следов абразивного износа в виде притертостей и пустот (рис. 4).

Спектральный анализ элементов в точках EDS Spot 2 и EDS Spot 4 (рис. 4, рис. 5б, г) позволил идентифицировать их как налипшие частицы обрабатываемого материала. Микроцарапина, полученная в результате абразивного износа (рис. 4, точка EDS Spot 3), также содержит следы обрабатываемого материала (рис. 5в). Однако, отсутствие сле-

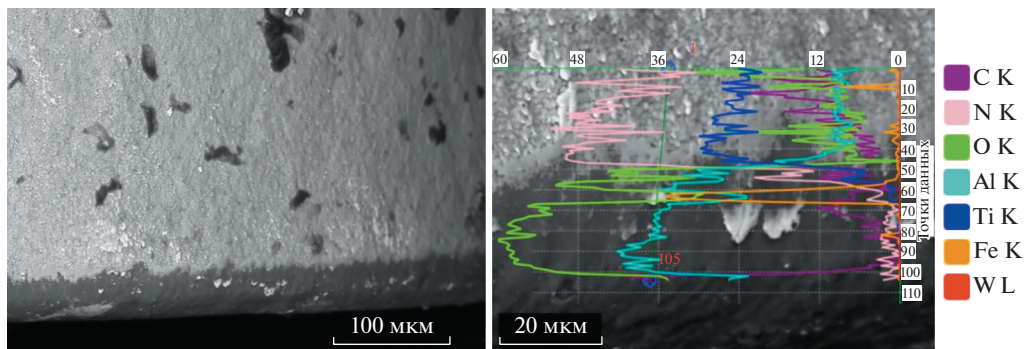


Рис. 2. Общий вид (а) и результаты спектрального анализа химического состава поверхностных слоев (б) по фаске износа по задней поверхности.

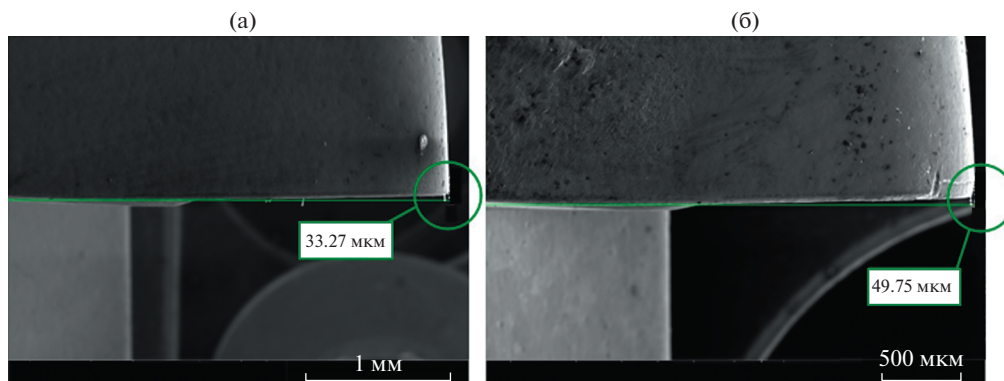


Рис. 3. Развитие деформации режущего клина (в круге) при температурно-силовом воздействии в процессе резания.

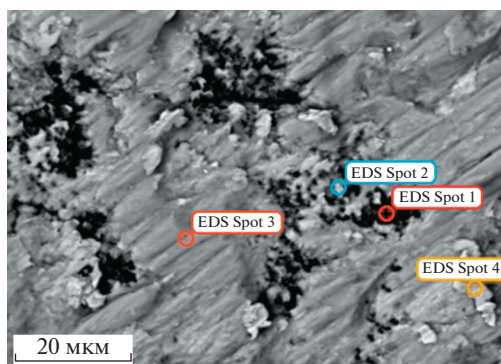


Рис. 4. Результаты FIB микроскопического исследования рабочей поверхности пластины.

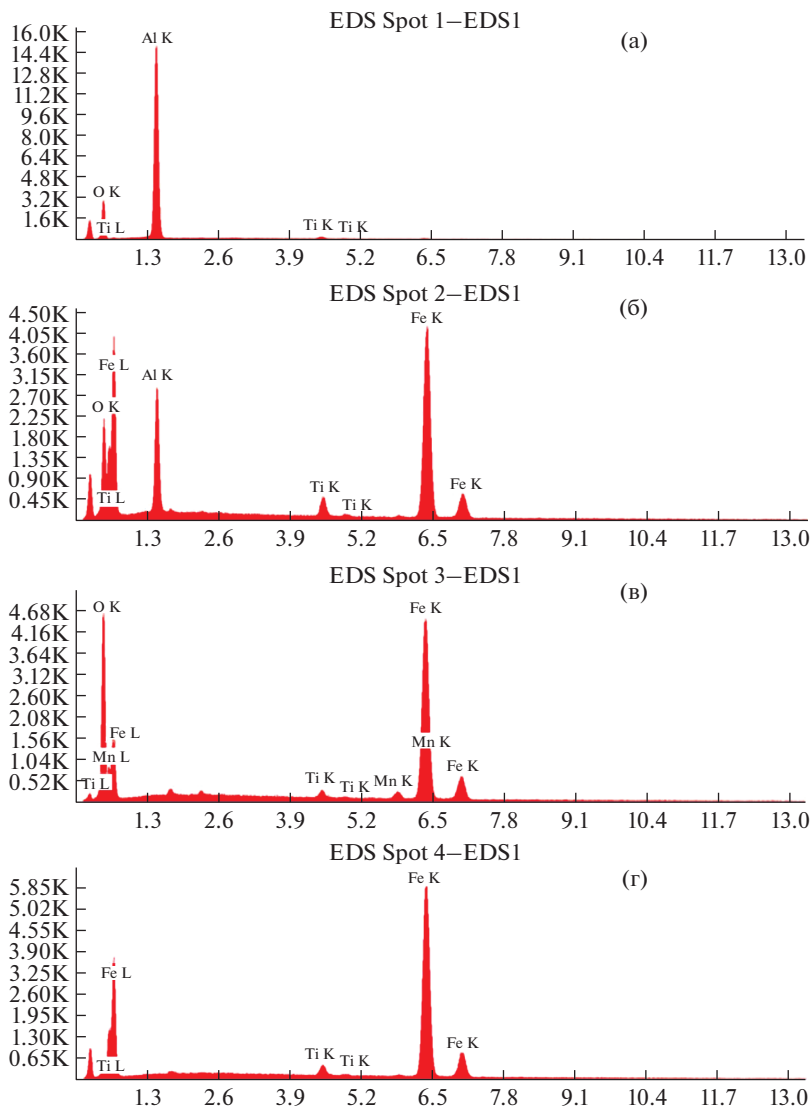


Рис. 5. Результаты спектрального анализа участков рабочей поверхности на рис. 4.

дов обрабатываемого материала в более глубоких слоях износостойкого покрытия (рис. 5, точка EDS Spot 1, рис. ба) позволяет сделать вывод об ограниченном присутствии диффузионных процессов при контактном взаимодействии. Говоря иначе, модифицированный поверхностный слой выступает в роли диффузионного барьера, обеспечивающего локальный характер образующихся дефектов, который не приводит к катастрофическим последствиям или ухудшению работоспособности пластин.

Кроме этого, наличие модифицированного поверхностного слоя уменьшает объективно существующую неоднородность и непостоянство размеров покрытия (рис. ба, б), а также влияние элементов структуры твердосплавной матрицы (рис. бв, г), включая де-

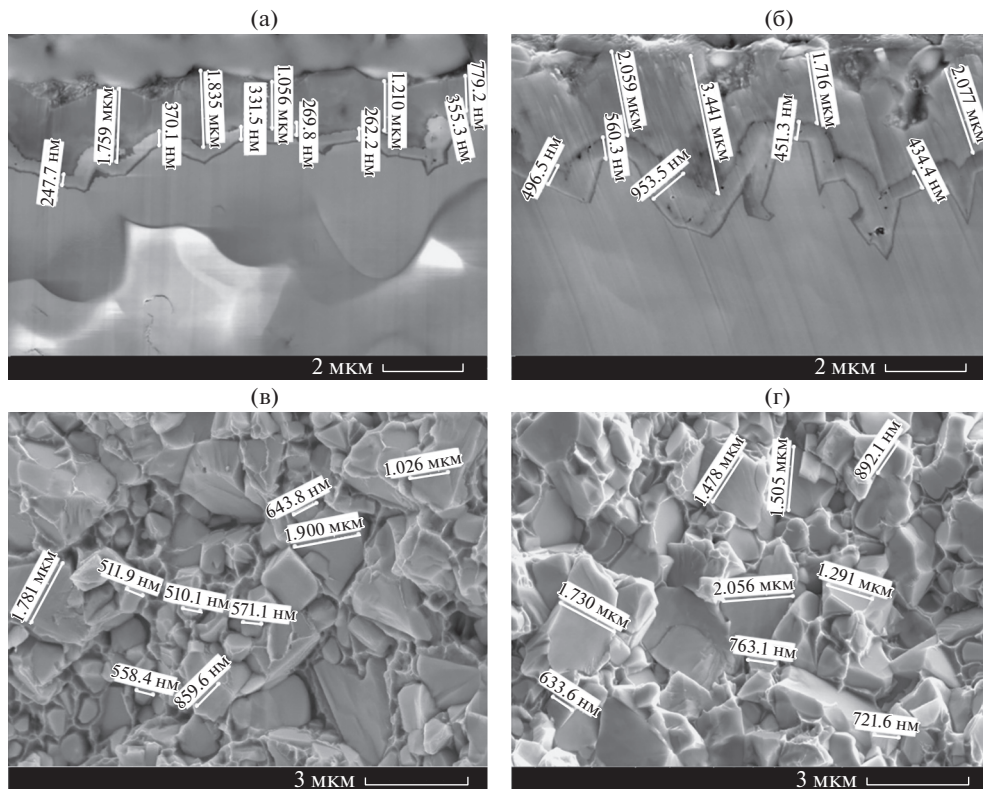


Рис. 6. Влияние непостоянства, неоднородности размеров покрытия пластин (а), (б) внутренней структуры твердосплавной матрицы (в), (г) на значение термоЭДС: (а), (в) – $E = 4.9$ МВ; (б), (г) – $E = 5.3$ МВ.

факты в ее объеме (в частности, микротрещины). В совокупности это обеспечивает стабилизацию режущих свойств пластин и снижение разброса значений термоЭДС.

С целью подтверждения достоверности результатов исследования было принято во внимание известное положение о том, что контактные процессы между рабочими поверхностями режущего инструмента, обработанной поверхностью заготовки и поверхностью стружки, а также деформационные процессы в зоне стружкообразования могут отображаться различными способами, в том числе и через изменение теплофизических свойств инструментального материала, в значительной степени влияющих на период его стойкости, который является основным показателем долговечности. Основной характеристикой теплофизических свойств является коэффициент теплопроводности [4–7]. Его измерение было выполнено с помощью прибора “КИТ-02Ц “Алмаз”, реализующего метод “горячей плиты”. Количество измерений определялось в соответствии с апробированными методиками как наибольшее из двух допустимых по критериям Стьюдента (условие неизменности среднего значения) и Фишера (условие неизменности дисперсии). Погрешность измерений в соответствии с паспортными характеристиками прибора – не более 5%.

Статистическая обработка полученных данных при доверительной вероятности 0.95, включала оценку их репрезентативности, стабильности и расчет средних значений и стандартных отклонений. Результаты обработки показали следующее: 1) стабильность значений коэффициента теплопроводности модифицированных пластин

Таблица 1. Изменение коэффициента теплопроводности модифицированных пластин для обработки материалов группы “Р”

Показатель	До модификации	После модификации	Изменение	Вероятность изменения
Среднее значение	22.99	22.96	0.03 (разность)	0.65%
Стандартное отклонение	0.108	0.070	1.54 (крат)	18.77%

Таблица 2. Изменение коэффициента теплопроводности модифицированных пластин для обработки материалов группы “М”

Показатель	До модификации	После модификации	Изменение	Вероятность изменения
Среднее значение	50.09	49.78	0.31 (разность)	0.49%
Стандартное отклонение	1.174	1.018	1.15 (крат)	39.17%

высока, поскольку коэффициент вариации его значений составил 0.003–0.08. Разброс значений коэффициента теплопроводности является случайным, поскольку все они попали в интервал, определяемый допустимой погрешностью измерительного прибора; 2) оценка изменений теплофизических свойств модифицированных пластин при их сравнении с теплофизическими свойствами обычных пластин показала (табл. 1, 2), что вероятности изменения среднего значения коэффициента теплопроводности, определенные по критерию Стьюдента, составили не более 0.65% и 0.49%, т.е. средние значения фактически не меняются. Стандартные отклонения значений коэффициента теплопроводности уменьшились примерно в 1.5 и 1.2 раза, что позволяет с вероятностями около 20% и 40% говорить о стабилизации теплофизических свойств пластин в результате воздействия низкотемпературной плазмы.

С целью объяснения полученных результатов примем во внимание, что теплопроводность в проводящих материалах осуществляется электронами (электронная теплопроводность) и упругими колебаниями атомов в узлах кристаллической решетки (фононная теплопроводность, которая может быть соизмеримой с электронной теплопроводностью). Степень теплопроводности определяют: структура материала, число и вид атомов и ионов, рассеивающих волновые колебания, а также длина свободного пробега фононов и степень нарушения гармоничности колебаний тепловых волн во время их прохождения через материал. Любое искажение кристаллической решетки или отклонение от кубической сингонии действует аналогично имеющимся в материалах примесям, увеличение содержания которых приводит к образованию дополнительных центров рассеивания тепловых упругих волн за счет нарушения дальнего порядка расположения атомов и, как следствие, уменьшения и электронной, и фононной доли теплопроводности [8, 9]. Но поскольку основным результатом модификации является формирование в поверхностном слое структуры, состоящей из локальных областей сжатия и растяжения, т.е. областей с увеличенным и уменьшенным периодом кристаллической решетки, содержащих уплотненные и разреженные фазы [1], постольку степень стабильности теплофизических свойств определяется степенью однородности структуры или равномерностью чередования сформированных областей.

Заключение. Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы. 1. На примере твердосплавных пластин с многослойным CVD-покрытием показано, что низкотемпературная плазменная модификация способствует повышению стабильности теплофизических свойств. В процессе эксплуатации при контакт-

ном взаимодействии с обрабатываемым материалом это способствует тому, что диффузионные и химические процессы протекают только на рабочих поверхностях и в модифицированном поверхностном слое и не затрагивают матрицу, обеспечивая более длительное сохранение режущей способности. 2. Повышение стабильности теплофизических свойств обеспечивается за счет формирования в поверхностном слое по результатам модификации структуры, состоящей из равномерно чередующихся локальных областей с увеличенным и уменьшенным периодом кристаллической решетки, т.е. областей сжатия и растяжения, содержащих уплотненные и разреженные фазы. Чем более однородными являются области, тем в большей степени они уменьшают влияние неоднородности и непостоянства размеров покрытия, а также элементов структуры матрицы и тем более стабильными являются теплофизические свойства.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00101.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

Авторы из института машиноведения РАН обосновали актуальность исследования, подход к его проведению и изучили диффузионные и химические процессы при контактном взаимодействии пластин. Авторы из Волгоградского государственного технического университета провели измерение и сравнение значений коэффициентов теплопроводности пластин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brzhozovskii B., Zinina E., Martynov V., Tabakov V.* Low-temperature plasma hardening impact on the properties of the cutting tool working part // *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Т. 124. Р. 183.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-10465-z>
2. *Бровкова М.Б., Мартынов В.В., Плешакова Е.С.* Основные направления повышения стойкости металлорежущего инструмента с модифицированной рабочей частью // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2020. № 2. С. 71.
3. *Тихонова Ж.С., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.* Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs [Электронный ресурс] // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Р. 1097.
4. *Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А.* Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСИС, 2004. 463 с.
5. Металлорежущий инструмент. Каталог. [Электронный ресурс] // URL: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/pages/tools.aspx>.
6. *Ингеманссон А.Р., Бондарев А.А.* Определение теплопроводности твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019. Т. 21. № 3. С. 97.
7. *Balaji A.K., Mohan V.S.* An “effective cutting tool thermal conductivity” based model for tool-chip contact in machining with multi-layer coated cutting tools // *Machining Science and Technology*. 2002. V. 6. № 3. Р. 415.
8. *Берман Р.* Теплопроводность твердых тел / Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 286 с.
9. *Кржижановский Р.Е.* Некоторые закономерности в поведении теплопроводности металлов и сплавов. В кн. “Тепло- и массоперенос”. Т. 1. Минск: Изд-во АН БССР, 1968. С. 115.