

УДК 621.793.1

Н. К. КРИОНИ, М. Ш. МИГРАНОВ, Л. Ш. ШУСТЕР

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ С ПРОГНОЗИРУЕМОЙ АДАПТАЦИЕЙ  
ПРИ ТРЕНИИ И РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ**

Рассматриваются вопросы повышения износостойкости инструмента за счет использования композиционных покрытий с прогнозируемой адаптацией при трении и резании металлов. *Износостойкость ; композиционные покрытия ; контактные явления ; тепловые процессы ; триботехнические характеристики.*

Повышение износостойкости режущего инструмента в настоящее время может быть достигнуто благодаря использованию покрытий из нитридов титана и алюминия (Ti, Al)N [1, 2]. Такие покрытия, как (TiAl)N характеризуются уникальными комбинациями свойств: высокой твердостью при повышенных температурах в зоне контакта вместе с термической и химической устойчивостью и низкой теплопроводностью. Важным преимуществом (TiAl)N покрытий является их склонность к окислению и к образованию относительно устойчивых поверхностных оксидных пленок. Дальнейшее повышение износостойкости (TiAl)N покрытий при резании можно получить путем доведения измельчения зерна до уровня нанoshкалы (размер зерна менее 100 нм) [2]. Это можно осуществить легированием (TiAl)N покрытий на инструментальный материал с помощью фильтрации магнитной дугой.

**ОСОБЕННОСТИ  
КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ**

Направленное изменение свойств покрытий путем варьирования их состава, структуры и строения позволяет существенно влиять на контактные характеристики процесса резания. Известно [1], что химический состав, физико-механические и теплофизические свойства покрытий могут значительно отличаться от соответствующих параметров инструментального и обрабатываемого материалов, и, как следствие, покрытие следует рассматривать как своеобразную "третью среду". Причем эта среда, с одной стороны, может заметно изменять поверхностные свойства инструментального

материала, с другой – влиять на контактные процессы, температуру и усилия резания, направленность тепловых потоков и термодинамическое напряженное состояние режущей части инструмента. Процесс трения на контактных площадках передней и задней поверхностей во многом определяется поверхностными свойствами пары трения «инструмент-деталь». Внешнее трение согласно молекулярно-механической теории имеет двойственную природу [2], обусловленную объемным деформированием материала и преодолением межатомных и межмолекулярных связей, возникающих между участками трущихся поверхностей. Согласно [3] наиболее простым и надежным способом оценки склонности к схватыванию инструментального и обрабатываемого материалов является метод определения таких триботехнических параметров, как прочность адгезионных связей на срез ( $\tau_m$ ) при наличии пластических деформаций на контакте, предельные нормальные напряжения ( $P_m$ ) и адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения ( $\tau_m/P_m$ ).

Нанесенные на инструментальные материалы покрытия позволяют значительно снизить силу трения и особенно это характерно для наиболее термодинамически неустойчивых покрытий в виде оксидов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Таким образом, даже при постоянном нормальном напряжении увеличиваются количество активных центров и площадь фактического контакта. Кроме того, повышение температуры способствует разруше-

нию поверхностных пленок и образованию химически чистых, «ювенильных», поверхностей. Последнее способствует проявлению схватывания и увеличению сил трения. Однако в результате дальнейшего повышения температуры происходит разупрочнение «узлов» схватывания и интенсивное окисление трущихся поверхностей. Эти обстоятельства зачастую приводят к снижению сил трения.

Цель данной работы – исследовать процессы трения и износа режущих инструментов с покрытиями (TiAl)N в условиях высокоскоростной обработки и определить влияние на эти процессы нанокристаллической структуры в покрытиях, формируемой при магнитно-дуговой фильтрации (МДФ).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Были исследованы два типа покрытий: обычное монослойное покрытие – (TiAl)N и усовершенствованное покрытие – (TiAl)N. Усовершенствованные покрытия наносились при фильтрации с помощью МДФ на установке типа ННВ-6.6-11. Такая схема позволяет воздействовать на физико-химические и плазмохимические процессы при нанесении термостойких покрытий за счет увеличения скорости ионизации как металлов, так и химически активных газов. При этом удается практически исключить образование капельных фаз, а также благодаря высокой скорости плазменной ионизации в камере установки и относительно низкой скорости нанесения покрытия, температура в начале кристаллизации низкая. Ионная бомбардировка с низкой энергией растущих пленок может ограничить рост зерен и способствовать образованию нанокристаллического слоя [4].

Поверхностная морфология и микроструктура покрытий была исследована с помощью просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии на установке JEOL JEM-201.

Химический состав вторичных структур, возникающих на поверхности режущего инструмента при трении в процессе резания, исследовался с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС), оже-электронной спектроскопии (ОЭС – «JXA-8400»; «Jeol» JEM-201 OE; спектрометр «Escalab – MK2», оборудованный электронным прожектором LEG200, ионным прожектором AG6 и анализатором ионной массы SQ300 квадрупольного типа; «Сатеса» модели MS-46).

Износ покрытий исследовался при обработке резанием стали 40Х. Обработка велась как с охлаждающей жидкостью, так и без нее. Была

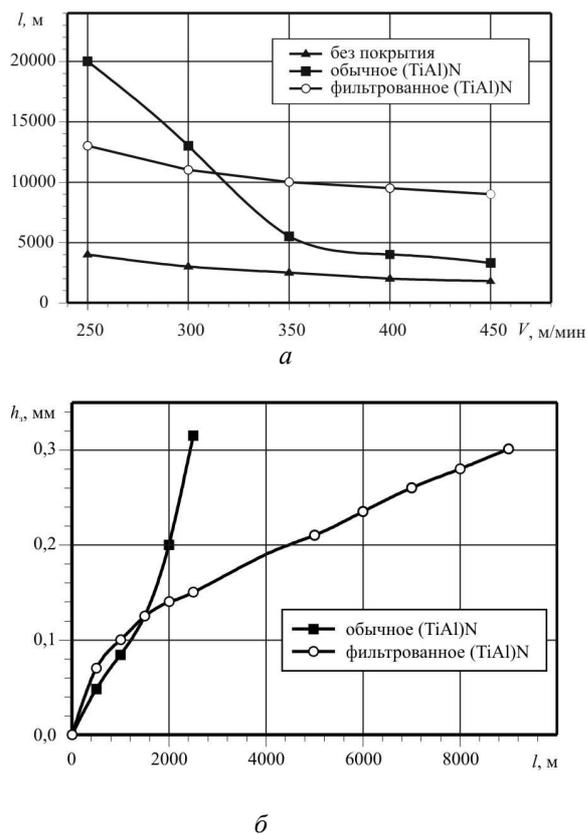
исследована износостойкость четырехгранных быстросменных пластинок на основе ТТ8К6 с покрытиями (TiAl)N, определены коэффициент трения на поверхности резания, коэффициент усадки стружки, угол условной плоскости сдвига обрабатываемого материала и измерены составляющие усилия резания с помощью динамометра УДМ-600.

Микротвердость покрытий (TiAl)N измерялась с помощью контрольно-измерительного прибора для определения наноуглублений (выемок) при приложенной нагрузке в 200 мН. Толщина покрытия была измерена с помощью устройства с шаровым кратером с точностью до 0,1 мкм. Адгезия покрытия к подложке определялась с помощью адгезиометра [3].

Проведенные исследования свидетельствуют, что два рассматриваемых покрытия близки по стехиометрическому составу, а отношение Al к Ti в обычном (TiAl)N покрытии ниже (0,88) по сравнению с МДФ (1,0). Основная особенность фильтрованных покрытий – это ультрамелкозернистая структура. Размеры зерна составляют примерно 60–80 нм вместо 100–120 нм для обычных (TiAl)N.

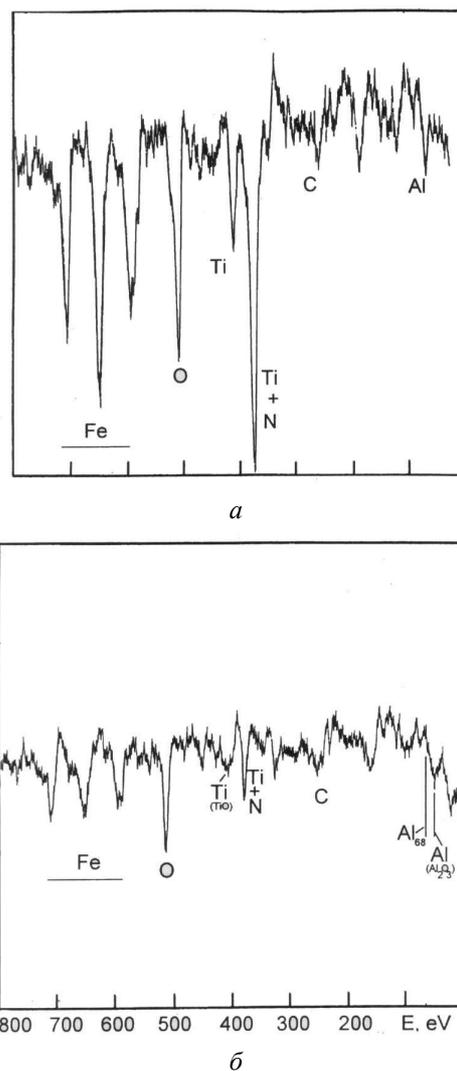
Износостойкость покрытий в значительной степени зависит от используемых режимов резания. При умеренных скоростях резания (250 м/мин) износостойкость инструмента с обычным покрытием выше фильтрованного, вследствие благоприятного сочетания твердости и адгезии с подложкой (рис. 1, а). Но износостойкость такого покрытия значительно уменьшается при скоростях резания выше 350 м/мин. Во время высокоскоростной обработки преобладает окислительный износ инструмента [5, 6], и устойчивость образующихся оксидных пленок с покрытием определяет износостойкость режущего инструмента. Вот почему фильтрованные покрытия с большим сопротивлением окислению имеют и более высокую износостойкость при высоких скоростях резания в диапазоне 450 м/мин (рис. 1, а). С другой стороны, улучшение в 1,5 раза сопротивления окислению фильтрованных покрытий не может само по себе объяснить увеличение износостойкости инструмента почти в 4 раза по сравнению с обычным покрытием (рис. 1, а). Для объяснения механизма этого явления были проведены дополнительные исследования поверхностей режущего инструмента и обрабатываемой детали.

Интенсивное трибоокисление поверхности режущего инструмента происходит во время высокоскоростной обработки. На рис. 2 приведены оже-электронные спектры для изношенных инструментов с обычными (а) и фильтрованными (б) покрытиями.



**Рис. 1.** Результаты стойкостных исследований при точении стали 40X резами ТТ8К6 с различными покрытиями ( $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм): *a* – влияние скорости резания на путь резания (при  $h_3 = 0,3$  мм); *б* – влияние пути резания на износ инструмента по задней поверхности (при  $V = 450$  м/мин)

Окисление контактных поверхностей очевидно, о чем свидетельствует наличие большого количества кислорода в обоих спектрах. Интенсивные ионные пики соответствуют зонам прилипания материала детали. Линия Ti значительно растянута (рис. 2, б) в этой зоне; это результат окислительного процесса. Повышенное количество окиси алюминия наблюдается на спектре фильтрованных покрытий, который показан как сдвиг алюминиевой линии к зоне более низкой энергии (60 эВ). На рис. 3, *a*, *б* представлен ряд спектров положительных вторичных ионов как для обычных, так и фильтрованных (TiAl)N покрытий. На рис. 3, *в*, *г* показаны спектры отрицательных вторичных ионов для обоих покрытий. На обоих положительных вторичных спектрах интенсивность TiO линии высокая и это происходит вследствие интенсивного трибоокисления, которое образует рутилоподобные пленки. Но некоторое количество окиси алюминия образуется только на поверхности фильтрованных покрытий и этот эффект можно наблюдать на спектре отрицательных вторичных ионов (рис. 3, *в*).

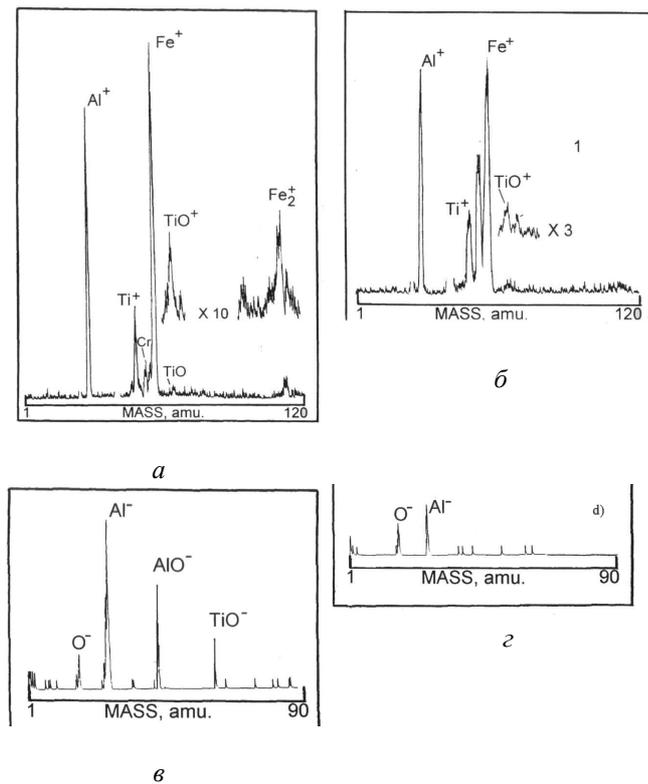


**Рис. 2.** Оже-электронные спектры поверхностей изношенных пластинок с покрытиями (TiAl)N ( $V = 450$  м/мин): *a* – обычное покрытие ( $l = 2280$  м); *б* – фильтрованное покрытие ( $l = 8900$  м)

Образование пленок оксида алюминия на поверхности резца значительно изменяет тепловые потоки и отвод тепла в стружку. Условия стружкообразования (коэффициент усадки стружки и угол условной плоскости сдвига), а также коэффициент трения по передней поверхности режущего инструмента, измеренные в процессе резания (табл. 1), также показывают значительное улучшение триботехнических параметров для инструментов с фильтрованными покрытиями.

Два основных улучшения в характеристиках поверхностей покрытия можно приписать методу магнитной фильтрации. Первое улучшение связано с полной или частичной фильтрацией фазы «капелька». В результате образуется поверхность с меньшей шероховатостью, которая влияет на уменьшение адгезии (сцепляемости) обрабаты-

ваемого материала с инструментальной поверхностью.



**Рис. 3.** Спектры положительных (*a, б*) и отрицательных (*в, г*) вторичных ионов поверхности изношенных пластинок с покрытиями (TiAl)N ( $V = 450$  м/мин): *a, б* – обычное покрытие; *в, г* – фильтрованное покрытие

Триботехнические параметры (TiAl)N покрытий

Покрытия	Триботехнические параметры		
	Коэффициент усадки стружки	Угол сдвига	Коэффициент трения на передней поверхности
Обычное	1,35	40,58	0,986
Фильтрованное	1,19	44,49	0,857

Второе улучшение связано с уменьшением сил трения и износа фильтрованных покрытий. Уменьшение сил трения важно для условий низкоскоростной обработки в области образования нароста. Но для условий высокоскоростной обработки, когда окислительный износ доминирует, способность покрытий образовывать защитные поверхностные пленки во время трения становятся особенно важными. Эта способность повышается для (TiAl)N фильтрованных

покрытий вследствие их нанокристаллической структуры. Нанокристалличность покрытия способствует образованию на поверхности защитного слоя из окиси алюминия [2]. Покрытия с мелкой зернистой структурой имеют большую протяженность границ зерен. В связи с этим необходимы большие пробеги атомов для внешней диффузии алюминия Al и внутренней диффузии кислорода. Это способствует образованию защитных алюминиевых окисных пленок и приводит к увеличению сопротивления поверхности окислению, что в конечном счете улучшает износостойкость инструмента во время высокоскоростного резания.

Все это свидетельствует о том, что трибоокисление является важным и благоприятным процессом для условий высокоскоростной обработки и происходит оно далеко от равновесного состояния. Это выдвигает на первый план особенности этого процесса по сравнению с обычным изотермическим окислением. Трибоокисление (TiAl)N покрытия имеет своим результатом структурную адаптацию поверхностных слоев к трудным условиям высокоскоростной обработки. Такая адаптация представляет собой процесс, основывающийся на явлении самоорганизации [3], в результате которого происходит повышение износостойкости инструмента. Такой способностью обладают фильтрованные покрытия, которые проявляют свои адаптивные характеристики в условиях высокоскоростной обработки. Кислородосодержащие соединения на металлической основе, которые образуются во время резания, могут действовать как экран, который защищает поверхность инструмента.

Основываясь на данных, представленных на рис. 1–3, можно заключить, что оксидные пленки, которые образуются на поверхности инструмента с (TiAl)N покрытиями, являются смесью из окиси алюминия и рутила, но только слой из оксида алюминия является защитным [6]. Во время высокоскоростной обработки пленки из окиси алюминия, образующиеся на поверхности, ограничивают взаимодействие нижележащих слоев покрытия с материалом детали и на инструменте образуются два типа защитных кислородосодержащих пленок на основе алюминия: аморфноподобные и кристаллические. Эти пленки окиси алюминия способствуют уменьшению износа, так как из-за низкой теплопроводности они препятствуют интенсивному отводу тепла, выработанному во время резания в тело режущего инструмента и значительно улучшению триботехнических параметров (таблица). Коэффициент трения на передней поверхности резца для фильтрован-

ных покрытий ниже (0,857) по сравнению с обычным покрытием (0,986). Характеристики стружки также показывают ту же самую тенденцию: коэффициент усадки стружки ниже, а угол условной плоскости сдвига выше для фильтрованного покрытия по сравнению с обычными (TiAl)N покрытиями (таблица). В результате благоприятных изменений в условиях трения, интенсивность изнашивания резцов с фильтрованными покрытиями уменьшается (рис. 1, б) и, таким образом, значительно повышает износостойкость инструмента.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно очертить некоторые общие тенденции, связанные с будущим развитием (TiAl)N покрытий для использования при высокоскоростной обработке. Для того чтобы повысить износостойкость и приспособляемость этих покрытий, необходимо образование в рабочей зоне режущего инструмента обоих типов защитных пленок из оксида алюминия (кристаллической трибокерамической и аморфноподобной) во время высокоскоростной обработки. Этого можно достигнуть, например, путем оптимизации химического состава покрытия, а также преобразования его структуры в уровень наноструктуры, в частности, вследствие применения МДФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Верещака, А. С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. М. : Машиностроение, 1993. 336 с.
2. **Fox-Rabinovich, G.S.** Characteristic features of alloying HSS – based deformed compound powder materials with consideration for tool self – organization at cutting / G. S. Fox-Rabinovich // *Wear*. 206. 1997. p. 214.
3. **Шустер, Л. Ш.** Прибор для исследования адгезионного взаимодействия / Л. Ш. Шустер, М. Ш. Мигранов. Патент на полезную модель № 34249 от 24.06.2003 г.
4. **Бершадский, Л. И.** Самоорганизация и надежность трибосистем / Л. И. Бершадский. Киев : Знание, 1981. 35 с.

5. **Польцер, Г.** Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры и самоорганизация / Г. Польцер, В. Эбиленг, А. Фирковский // *Трение и износ*. 1988. Т.9, №1. – С. 12.

6. **Шустер, Л. Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке / Л. Ш. Шустер, Н. К. Криони, В. Ю. Шолом, М. Ш. Мигранов. М. : Машиностроение, 2008. 318 с.

### ОБ АВТОРАХ

**Криони Николай Константинович**, проф., прорект. УГАТУ. Дипл. инж.-мех. по техн. машиностр. (УАИ, 1971). Д-р техн. наук по трению и износу в машинах (РГУПиГ им. И. М. Губкина, 1985). Иссл. в обл. трибологии контактн. взаимодействия, методики и организации учеб. процесса в высш. школе.



**Мигранов Марс Шарифуллович**, проф. каф. ОКМиМ. Дипл. инж.-мех. (1987, УАИ). Д-р техн. наук по процессам мех. и физ.-техн. обработки (РУДН, 2007). Иссл. в обл. износостойкости режущ. инстр. и повышения эффективности лезвийн. обр. резанием.



**Шустер Лева Шмульевич**, проф. каф. ОКМиМ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1962). Д-р техн. наук по трению и износу в машинах (РГУНиГ им. И. М. Губкина, 1989). Иссл. в обл. высокотемп. трибологии.

