

УДК 621.9.025.7-586:669.018.25:539.61

В. А. Залого, Д. В. Криворучко (г. Сумы)

В. Я. Лебедев (г. Минск, Беларусь)

О. А. Залого (г. Сумы)

Влияние ионно-лучевой имплантации азота на адгезионные свойства твердого сплава VK8

Представлены результаты исследований влияния ионно-лучевой имплантации азота на адгезионные свойства твердого сплава VK8. Методом вдавливания вращающегося индентора в контртело измерена адгезионная составляющая коэффициента трения и показано, что она уменьшается при модификации поверхности ионно-лучевой имплантацией азота, особенно при контактных давлениях, больших предела текучести контртела.

***Ключевые слова:** трение, адгезия, ионная имплантация, твердый сплав, нержавеющей сталь, индентор.*

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении все чаще применяются новые конструкционные материалы, обладающие особыми свойствами и, как правило, отличающиеся низкой обрабатываемостью резанием. Вместе с тем непрерывная конкурентная борьба машиностроительных предприятий требует постоянного повышения производительности механической обработки и обеспечения все более жестких требований к качеству обработанных поверхностей.

Известно, что в процессе контактного взаимодействия лезвия со срезаемым слоем, стружкой и поверхностями на обрабатываемой детали (заготовке) возникают силы сопротивления скольжению, выделяется тепло и, следовательно, повышается температура, что в комплексе вызывает интенсивное изнашивание режущего инструмента [1]. Одним из эффективных способов повышения износостойкости инструментов является поверхностное упрочнение их контактных поверхностей, например ионной имплантацией, позволяющей внедрением в поверхность ионов различных химических элементов создавать благоприятные трибологические и механические свойства этой поверхности и изменять характер контактного взаимодействия элементов системы резания.

Поисковые исследования показали потенциальную возможность повышения износостойкости керамических инструментов благодаря применению ионной имплантации [2]. В настоящее время одним из наиболее перспективных методов модификации рабочих поверхностей лезвий режущих инструментов является ионно-лучевая имплантация азота в поверхность твердых сплавов, что обеспечивает образование в ней карбонитридов вольфрама $W(C, N)$, $W_{1-2}(C, N)$, $W_2(C, N)$ с жесткими ковалентными связями. Этот процесс позволяет создавать, в принципе, новый комплекс физико-механических свойств в поверхностных слоях, в первую очередь прочностных и трибологи-

ческих, за счет внедрения атомов в кристаллическую решетку инструментального материала. Создаваемая при этом аморфная структура способствует изменению коэффициента трения. Более того, напряжения сжатия, возникающие в этом модифицированном слое, препятствуют выкрашиванию карбидов и способствуют повышению стойкости инструмента.

Однако следует отметить, что влияние ионно-лучевой имплантации азота на трибологические свойства твердого сплава при резании до настоящего времени практически не изучено и, тем более, нет данных о величине коэффициента трения при высоких контактных давлениях твердых сплавов с модифицированной поверхностью. Поэтому целью настоящей работы является изучение влияния ионно-лучевой имплантации азота на трибологические свойства двух наиболее широко распространенных в резании контактных пар – ВК8–сталь 45 и ВК8–сталь 12Х18Н10Т, и определение значений коэффициентов трения при высоких контактных давлениях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

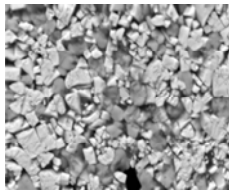
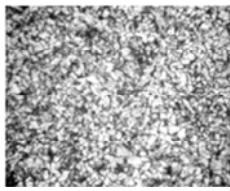
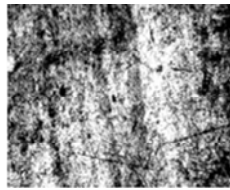
Исследования проводили методом вдавливания в полупространство (поверхность образца из обрабатываемого материала) сферического индентора из твердого сплава ВК8 с модифицированной ионной имплантацией поверхностью [3]. Этот метод, по мнению авторов, позволяет получить наиболее достоверные значения количественных характеристик адгезионного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в условиях близких к имеющимся на передней поверхности резца в процессе резания. В первом приближении было принято, что влияние температуры до 700 °С на адгезионную составляющую несущественно [4].

Два индентора были выполнены из твердого сплава ВК8 в виде сферы диаметром 8,7 мм с отклонением от круглости не более 1 мкм. Шероховатость поверхности сферы $Ra = 0,2$ мкм обеспечивали полированием. Первый индентор из базового сплава (далее ВК8) имплантации не подвергали. Второй индентор (далее ВК8И) подвергали имплантации азотом на вакуумной установке УВН-2М, разработанной в Физико-техническом институте НАН Беларуси, при температуре нагрева имплантируемого образца до 600 °С, плотности тока $j = 2$ мА/см² и выдержке 2 ч. Толщина азотированного слоя после имплантации находилась в пределах от 2 до 3 мкм. Полирование поверхности индентора выполняли после его имплантации с целью создания одинакового микрорельефа у обоих инденторов. Шероховатость сферического индентора контролировали с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-100УМ, наблюдая за участком поверхности размером 250×250 мкм в режиме ТОРО с последующим вычислением показателя Ra . При этом использовали следующее свойство режима ТОРО: яркость определенной точки изображения, полученного в данном режиме, пропорциональна углу наклона поверхности в этой точке к оси микроскопа.

Образцы цилиндрической формы высотой не менее 20 мм были выполнены из стали марок 45 и 12Х18Н10Т. Шероховатость Ra торцевых поверхностей образцов перед проведением испытаний составляла 0,8 мкм. Характеристика исследуемых материалов приведена в табл. 1.

Перед проведением испытаний образец из обрабатываемого материала и индентор обезжировали 90 %-ным раствором этилового спирта. Остатки пленок с поверхностей контакта абсорбировали активированным углем. Испытания начинали не более чем через 30 с после обезжиривания.

Таблица 1. Характеристика исследуемых материалов

Материал	Твердый сплав ВК8	Сталь 45	Сталь 12X18H10T
Стандарт	ГОСТ 3882–74	ГОСТ 1050–88	ГОСТ 5949–85
Химический состав, % (по массе)	WC – 92	C – 0,42–0,5	C – 0,108
	Co – 8	Cr – 0,25	Cr – 16,86
		Ni – 0,25	Ni – 9,25
		Mn – 0,50–0,80	Mn – 1,10
		Si – 0,17–0,37	Ti – 0,66
		Cu < 0,25	Si – 0,465
		As – 0,08	Cu – 0,31
		P – 0,035	P – 0,034
		S – 0,04	S – 0,014
		Fe – остальное	Fe – остальное
Механические свойства	<i>HRA</i> 88,0	<i>HB</i> 140	<i>HB</i> 160
	$\sigma_{\text{н}} = 1666$ МПа	$\sigma_{\text{в}} = 470$ МПа $\sigma_{0,2} = 250$ МПа	$\sigma_{\text{в}} = 550$ МПа $\sigma_{0,2} = 255$ МПа
Микроструктура	 ×5000	 ×500	 ×500

Испытания проводили на вертикально-фрезерном станке. Вращение индентору придавали от шпинделя станка через специальную оправку. Заготовку устанавливали на стол двухкомпонетного динамометра специальной конструкции, измеряющего одновременно крутящий момент T и осевую силу N . Биение индентора относительно оси вращения не превышало 10 мкм. Задавали четыре осевые силы: 4000 ± 100 , 2000 ± 100 , 1000 ± 100 , 500 ± 50 Н. Предварительная нагрузка составляла 4500 ± 100 Н, что обеспечивало формирование в каждом испытании лунки одинакового диаметра. Для стали 45 диаметр лунки составлял 2,7 мм, для стали 12X18H10T – 2,5 мм. Частота вращения индентора при испытаниях – 31,5 об/мин. Нагружение индентора производили по жесткой схеме нагружения с использованием специально разработанного авторами алгоритма [3]. Фактическую осевую силу и момент вращения индентора регистрировали в период стабилизации крутящего момента, который наступал через 5–10 с после начала вращения индентора. Каждый опыт повторяли три раза. Среднее квадратическое отклонение измеренной осевой силы не превышало 200 Н, а среднее квадратическое значение измеренного момента вращения – 27 Н·мм. Доверительные интервалы нормальных и касательных напряжений при доверительной вероятности 0,95 составили 40 и 7 МПа соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний представлены на рис. 1. В испытаниях были достигнуты контактные давления 900 и 750 МПа для стали марок 45 и 12X18H10T соответственно, что в 3,6 (для стали 45) и 2,9 (для 12X18H10T)

раза превышают предел текучести материала образца (см. табл. 1). По данным М. Ф. Полетики при резании конструкционных материалов твердостью до 200 НВ среднее контактное давление находится в пределах от 150–800 МПа [5]. Таким образом, достигнутые при испытаниях давления соответствуют величине давления при резании.

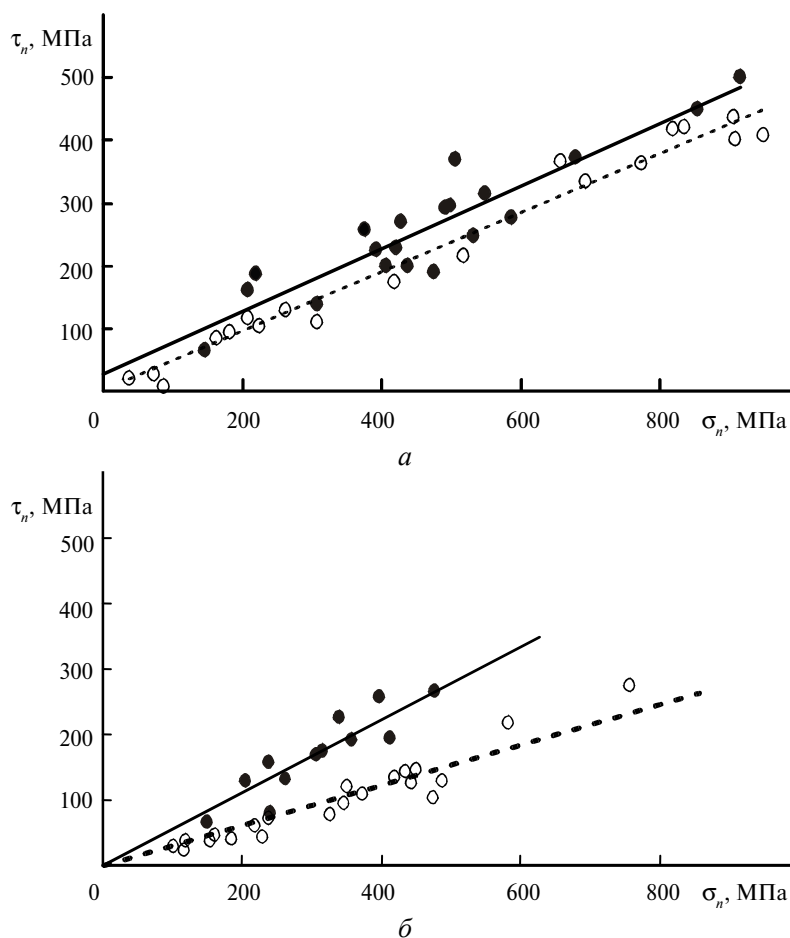


Рис. 1. Влияние ионной имплантации азота на касательные напряжения сопротивления скольжению в парах ВК8–сталь 45 (а) и ВК8–сталь 12Х18Н10Т (б): исходный (●) и имплантированный (○) инденторы; символами (●,○) обозначены экспериментальные данные, линиями – их аппроксимация классической линейной моделью адгезионного трения.

Малые шероховатости индентора и образца, тщательное удаление пленок окислов с контактных поверхностей позволяют говорить о незначительной доле деформационной составляющей в общей величине напряжений τ_n . По этим же причинам можно считать, что фактическая площадь контакта при испытаниях была близка к номинальной. Отсутствие заметных повреждений на поверхности контакта (рис. 2) подтверждает, что преимущественным в данном случае является внешнее трение. В этом случае хорошей аппроксимацией экспериментальных данных, по мнению авторов, является классическая линейная модель адгезионного трения [4]:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta_0 \sigma_n, \quad (1)$$

где τ_0 – прочность адгезионных связей; β_0 – коэффициент упрочнения адгезионных связей с повышением нормального давления в контакте; σ_n – контактное давление.

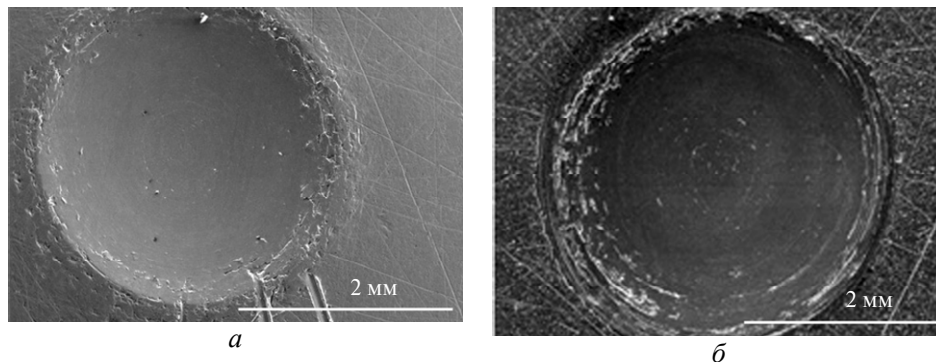


Рис. 2. Фотоснимки отпечатка имплантированного (а) и исходного (б) инденторов в образце из стали 45 после проведения испытаний при осевой нагрузке 4000 Н.

Аппроксимация экспериментальных данных выполнена методом наименьших квадратов. Полученные коэффициенты модели адгезионного трения представлены в табл. 2 и на рис. 1. Величина коэффициента детерминации для всех моделей составила не менее 76 %, что по шкале Чеддока свидетельствует о близости модели к эмпирическим наблюдениям.

Таблица 2. Модели адгезионного трения для исследованных контактных пар

ВК8–сталь 45	ВК8И–сталь 45	ВК8–сталь 12Х18Н10Т	ВК8И–сталь 12Х18Н10Т
$\tau_n = 25 + 0,50\sigma_n$	$\tau_n = 0,47\sigma_n$	$\tau_n = 0,56\sigma_n$	$\tau_n = 0,31\sigma_n$

Полученные результаты в 5–10 раз завышены ($\tau_0 = 0,35$ –290 МПа, $\beta_0 = 0,06$ –0,09) по сравнению с линейной моделью Н. М. Михина [6] для чистых металлов при контактном давлении равном их твердости. С другой стороны, эти результаты близки к данным Л. Ш. Шустера [4], полученным при давлениях меньшей твердости обрабатываемого материала. Так, для пары трения ВК6М–сталь 12Х18Н10Т им создана линейная модель с $\tau_0 \approx 100$ МПа, $\beta_0 = 0,3$ –0,4. При контактном давлении 200 МПа данные авторов и Л. Ш. Шустера отличаются на 60 %, а при 400 МПа полностью совпадают, при дальнейшем увеличении давления, вплоть до значений твердости материала (1600 МПа), отличаются не более чем на 35 %. Такой результат в целом можно считать удовлетворительным, поскольку контактное давление на передней поверхности лезвия при резании стали 12Х18Н10Т редко достигает значений ее твердости и тем меньше, чем больше силы трения [7]. Принципиальное различие состоит в значениях прочности адгезионных связей. Практически нулевые значения τ_0 , полученные нами, можно объяснить тем, что используемая в работе методика предполагает измерение сопротивления скольжению, обусловленного молекулярным взаимодействием поверхностей, а не собственно напряжениями разрушения адгезионных связей, достигаемых в момент начала скольжения (страгивания), как у Л. Ш. Шустера [4]. Это указывает на то, что при актив-

ном скольжении прочность адгезионных связей τ_0 значительно меньше, чем в момент начала скольжения (страгивания).

При характерных для резания давлениях напряжение τ_n находится в пределах 100–425 МПа (для пары сталь 45–ВК8) и тем больше, чем больше контактное давление σ_n . Если сравнивать эти величины с прочностью адгезионных связей τ_0 в момент начала скольжения (страгивания) по Л. Ш. Шустеру [4], то они составляют от 100 до 425 %. Из модели трения (см. табл. 2) следует, что основное влияние на τ_n оказывает упрочнение молекулярных связей, вызывавшее рост τ_n с увеличением σ_n при $\tau_0 \rightarrow 0$.

Полученные результаты показывают, что ионная имплантация поверхности твердого сплава уменьшает трение в исследованных контактных парах, особенно в паре ВК8–сталь 12Х18Н10Т. В паре ВК8–сталь 45 модификация поверхности индентора уменьшила прочность адгезионных связей τ_0 при нулевом контактном давлении, но сохранила ту же самую способность к упрочнению при возрастании контактного давления. Прочность адгезионных связей уменьшилась с 25 МПа практически до нуля. В паре ВК8–сталь 12Х18Н10Т модификация поверхности индентора при возрастании контактного давления привела к существенному (на 45 %) уменьшению способности адгезионных связей к упрочнению.

Более информативным является сравнение коэффициентов трения μ при различных контактных давлениях (рис. 3). В паре ВК8–сталь 45 коэффициент трения уменьшается с 0,75 до 0,56 с увеличением контактного давления. Модификация поверхности индентора уменьшает этот коэффициент до 0,47 и делает его независимым от контактного давления. Фотоснимки отпечатков (см. рис. 2, а) подтверждают эти выводы, демонстрируя лучшее качество поверхности после испытаний индентора с модифицированной поверхностью. В паре ВК8–сталь 12Х18Н10Т с увеличением контактного давления коэффициент трения не изменяется и находится на том же уровне, что и в паре ВК8–сталь 45 при $\sigma_n = 400$ МПа. Ионная имплантация способствует уменьшению коэффициента трения до 0,31, также сохраняя его неизменным с изменением контактного давления.

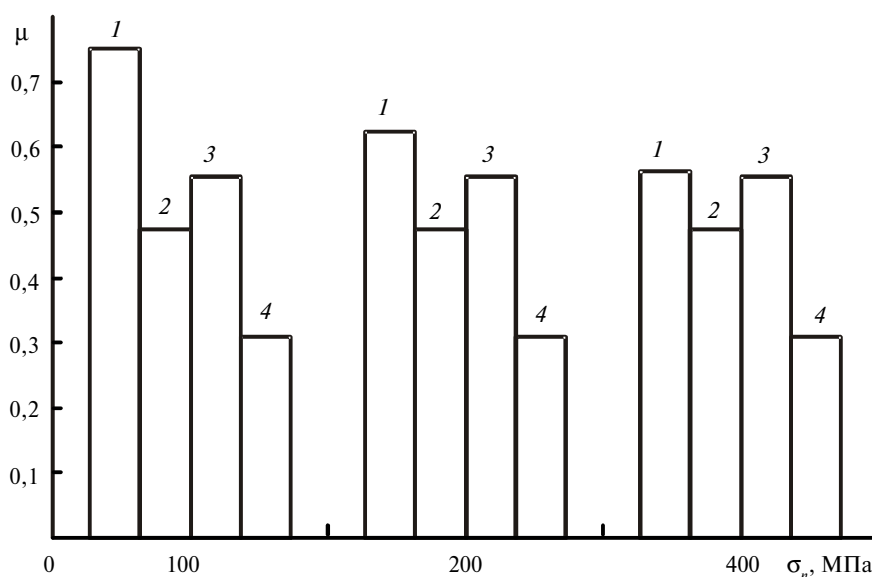


Рис. 3. Коэффициенты трения в исследуемых парах трения при различном контактном давлении: ВК8–сталь 45 (1), ВК8И–сталь 45 (2), ВК8–сталь 12Х18Н10Т (3), ВК8И–сталь 12Х18Н10Т (4).

Объяснением выявленного положительного влияния ионной имплантации азота может служить трансформация фазового структурного состояния поверхностного слоя твердосплавного индентора вследствие создания в нем высокой концентрации азота. В результате такого повышения концентрации азота, как показали исследования А. В. Белого, В. А. Кукаренко, О. В. Лободаева и др., на поверхности твердого сплава могут формироваться наноразмерные аморфизированные слои, а в подповерхностных модифицированных слоях – новые высокопрочные фазы и поля сжимающих напряжений [8].

ВЫВОДЫ

При исследовании влияния ионно-лучевой имплантации поверхности на адгезионные свойства твердого сплава ВК8 в парах трения ВК8–сталь 45 и ВК8–сталь 12Х18Н10Т методом вдавливания сферического вращающегося индентора достигнуты давления в 2,9–3,6 раза превышающие предел текучести исследуемых сталей.

При активном скольжении прочность адгезионных связей значительно меньше, чем в момент начала скольжения (страгивания), и основное влияние оказывает упрочнение молекулярных связей.

Ионно-лучевая имплантация азотом поверхности твердого сплава ВК8 способствует снижению упрочнения адгезионных связей, причем наиболее существенное (на 45 %) снижение выявлено для пары ВК8–сталь 12Х18Н10Т. Кроме того, для пары ВК8–сталь 45 такая обработка твердого сплава приводит к снижению коэффициента трения, особенно при малых контактных давлениях.

Наведено результати досліджень впливу іонно-променевої імплантації азоту на адгезійні властивості твердого сплаву ВК8. Методом вдавливання індентора, що обертається, в контртіло виміряна адгезійна складова коефіцієнта тертя і показано, що вона зменшується при модифікації поверхні іонно-променевою імплантацією азоту, особливо при контактних тисках, більших за межу текучості контртіла.

Ключові слова: *тертя, адгезія, іонна імплантация, твердий сплав, нержавіюча сталь, індентор.*

The results of studying the effect of nitrogen ion-beam implantation on the adhesiveness of the WC–8Co hard alloy have been discussed. The indentation of a rotating indenter into a counterbody has been used to measure the adhesion component of the friction coefficient, which has been shown to decrease in the surface modification by the nitrogen ion-beam implantation, especially when contact pressures exceed the counterbody yield strength.

Keywords: *friction, adhesion, ion implantation, hard alloy, stainless steel, indenter.*

1. Мазур М. П., Внуков Ю. М., Доброскок В. Л. та ін. Основи теорії різання матеріалів: Підруч. / За заг. ред. М. П. Мазура. – Львів: Новий світ, 2010. – 422 с.
2. Залого В. А., Криворучко Д. В., Лебедев В. Я. Имитационное моделирование процесса прерывистого резания керамическими инструментами, упрочненными ионно-лучевой имплантацией // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – Вип. 75. – С. 123–128.
3. Залого В. А., Криворучко Д. В., Залого О. А., Некрасов С. С. Методология экспериментального определения деформационной и адгезионной составляющих среднего коэффициента трения при резании // Вісн. Кременч. держ. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 6. – С. 63–70.
4. Шустер Л. Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. – М.: Машиностроение, 1988. – 96 с.
5. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 150 с.

6. *Михин Н. М.* Внешнее трение твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 211 с.
7. *Криворучко Д. В.* Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: Авторефер. дис. ... докт. техн. наук. – Харків, 2010. – 40 с.
8. *Белый А. В., Кукаренко В. А., Лободаева О. В.* Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов. – Минск: Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси, 1998. – 220 с.

Сумской государственный ун-т
Физико-технический ин-т НАН Беларуси

Поступила 04.02.11