

5. J. Hu, Y. K. Chou, Characterizations of cutting tool flank wear-land contact, *Wear* (2007) 263, Iss 7-12 SPEC. ISSS 1454-1458.
6. V. N. Kozlov, Flank Contact Load Distribution at Cutting Tool Wear, *Proc. 7th Int. Forum on Strategic Technology* (2012) 2 147-151.

ВЛИЯНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ПРИ ТОЧЕНИИ СТАЛИ

Лю Шэньян, Чжан Цзяюй, Козлов Виктор Николаевич

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич, к.т.н, доцент ТПУ
Томский политехнический университет

Для повышения производительности обработки и качества деталей сегодня практически всегда используются инструменты с износостойкими покрытиями [1, 2, 3]. Применение покрытия позволяет не только увеличить стойкость режущего инструмента, но и уменьшить коэффициент трения на рабочих поверхностях, что приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности, степени наклёпа и остаточных напряжений в поверхностном слое.

Синтезирование покрытий на основе различных соединений тугоплавких металлов (нитриды, карбиды, бориды, оксиды и их смеси) и нанесение нескольких слоёв позволяет существенно увеличить долговечность такого композиционного покрытия. Толщина каждого слоя возможна всего нескольких тысячных долей микрометра, что позволяет уменьшить расход дефицитных и дорогих материалов, сократить время нанесения покрытия. Вопрос надёжности работы такого тонкого покрытия решается путём совершенствования технологии нанесения покрытия и уменьшения тем самым различных дефектов, достижения наибольшей прочности, вплоть до так называемой теоретической прочности.

При нанесении покрытия одной из главных задач является прочность его сцепления с основным режущим материалом. Для этого необходима близость и совместимость их кристаллохимических и физико-механических свойств и совместимы, предотвращение пограничных реакций. Особенно актуально эта задача встаёт при высокой температуре резания, что характерно при промышленных режимах резания для достижения наибольшей производительности.

Другими главными задачами являются высокая твёрдость, превышающая твёрдость инструментального материала для обеспечения эффективности, и минимальное химическое сродство с обрабатываемым материалом для уменьшения адгезии и диффузионных процессов даже при высокой температуре.

Чтобы реализовать эти противоречивые требования при нанесении покрытия приходится использовать несколько слоёв.

Наиболее часто в качестве износостойких покрытий или их слоёв используются соединения тугоплавких металлов (керамические покрытия): TiN, TiCN, (Ti, Cr)N, (Ti, Zr)N, (Ti, Al)N, (Ti, Al)CN, Al₂O₃ и др. [1, 2, 3].

Для нанесения покрытий чаще всего используются четыре метода. Одним из них является химическое осаждение покрытий (ХОП), или CVD (Chemical Vapour Deposition) из газовой фазы. С помощью него получают соединения на основе нитридов, карбидов, карбонитридов и боридов тугоплавких металлов – Al₂O₃, TiN, TiC, ZrN, TiCN и др. По температуре, при которой происходит реакция, различают высоко температурный метод (HT-CVD – High-Temperature CVD) и средне температурный (MT-CVD – Medium-Temperature CVD). Температура при этом превышает 750 °С. Более низкая температура – около 550...650 °С, достаточна для нанесения покрытий плазменным методом (PA-CVD – Plasma Assisted CVD).

Скорость нанесения покрытий выше перечисленными методами довольно высокая (5...8 мкм/ч), возможно нанесение и многослойных покрытия. Общая толщина покрытия обычно от 5 до 25 мкм [1, 2, 3].

С увеличением температуры нанесения покрытия увеличивается прочность сцепления покрытия с основой. Но при этом увеличивается деформация режущей пластины, появляются дефекты и происходят нежелательные изменения структуры вблизи поверхности. При этом необходимо помнить, что после нанесения покрытия режущая пластина не должна подвергаться механической обработки с целью увеличения её точности, которая очень важна при замене пластины после её износа или повреждения.

При физическом осаждении покрытия в вакууме (ФОП), или PVD (Physical Vapour Deposition), происходит испарение требуемого вещества с так называемой мишени в вакуумной камере, ионизация испарённых частиц, их ускорение в электрическом (магнитном) поле в направлении к покрываемой поверхности, где происходит их конденсация в присутствии реакционного газа [1, 2, 3]. Превращение твердого вещества в металлический пар осуществляется несколькими способами: катодным пятном вакуумной дуги (вакуумно-дуговое

испарение); ионным пучком (магнетронное распыление); электронным пучком (электронно-лучевое испарение). Нанесение покрытий происходит при сравнительно низкой температуре 500...600 °С [1, 2, 3].

Несмотря на то, что наиболее важную задачу выполняет верхний слой покрытия, нижележащие слои не только осуществляют связь между верхним слоем и материалом режущей пластины, но и снижают передачу тепла в инструмент, уменьшают диффузию между верхним слоем и материалом инструмента. Чем больше слоёв, тем меньше передача тепла в инструментальный материал режущей пластины, т.к. тепловой поток наиболее эффективно уменьшается на границе слоёв. С другой стороны, чрезмерное увеличение количества слоёв приводит к удорожанию режущего инструмента. При большой контактной нагрузке во время резания для предупреждения растрескивания верхнего слоя покрытия стараются использовать нижележащий слой с более высокой величиной модуля упругости.

Для определения вероятности разрушения инструментального материала и покрытия были созданы 3-D модели режущей пластины с покрытием и без него. Внешние нагрузки задавались приложением контактных напряжений, полученных методом разрезного резца и по полученному закону распределения [4, 5]. Напряжён-деформированное состояние (НДС) режущего клина из твёрдого сплава T15K6 было исследовано методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS12 (рис. 1).

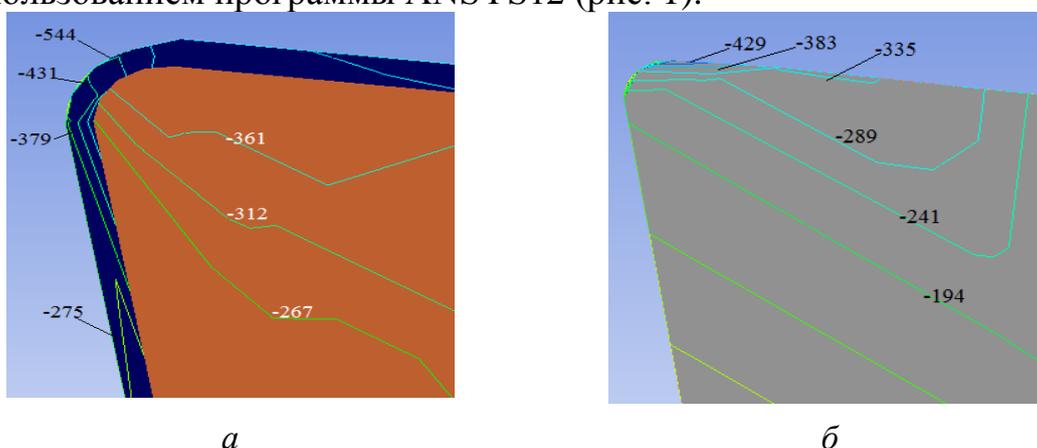


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений σ_x [МПа] в режущем клине резца при резании стали 40X, $v = 2$ м/с; $s = 0,07$ мм/об; $t = 1$ мм; $r = 5$ мкм; $h_z = 0$ мм.

a – СМП из T15K6 с покрытием TiCN; *б* – СМП из T15K6 без покрытия

Анализ НДС показал, что пластина с покрытием имеет меньшие внутренние напряжения (σ_x наиб. р.клина с покр = -361 МПа) по сравнению с режущей пластиной без покрытия

(σ_x наиб р.клина без покр = -429 МПа), хотя в самом слое покрытия нормальные напряжения больше, чем в пластине без покрытия (σ_x наиб покр = -544 МПа против σ_x наиб р.клина без покр = -429 МПа). Этот результат объясняется нами увеличенным модулем упругости Юнга у покрытия TiCN. Малое количество дефектов в покрытии при его нанесении методом PVD и поэтому его повышенная прочность даже при его небольшой толщине позволяют выдерживать большие напряжения.

На рис. 2 приведена зависимость изменения длины фаски износа задней поверхности h_3 [мм] от времени обработки t [мин] стали 40X при использовании пластин из твердого сплава T15K6 без покрытия и с покрытием TiCN.

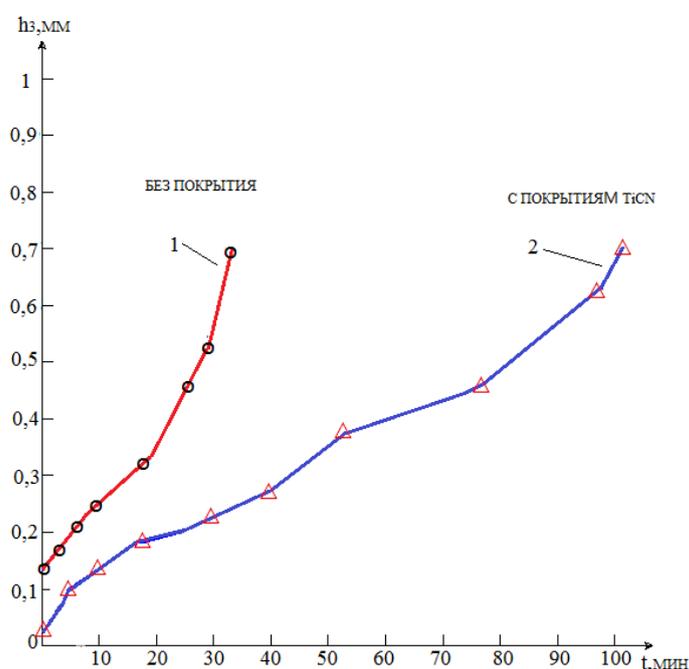


Рис. 2. Изменение длины фаски износа задней поверхности h_3 [мм] твердосплавных пластин в зависимости от времени t [мин] точения стали 40X. $v = 300$ м/мин; $s = 0,07$ мм/об; $t = 1$ мм.

1 – T15K6; 2 – T15K6 с покрытием TiCN

Полученные графики подтверждают уменьшение интенсивности износа по задней поверхности при использовании пластин с покрытием. Большой эффект наблюдается при увеличении допустимой длины фаски износа задней поверхности h_3 более 0,15 мм. При полустойковой обработке предельная длина фаски не должна превышать 0,25 мм, поэтому при указанном режиме резания и h_3 пред = 0,25 мм стойкость режущей пластины с покрытием TiCN будет в 2,5 раза больше ($T_{\text{без покр}} = 15$ мин, $T_{\text{с покр}} = 42$ мин).

Несмотря на то, что после появления фаски износа на задней поверхности на ней уже нет покрытия, всё равно остаётся защитное действие со стороны покрытия на передней поверхности, которое немного нависает над фаской и уменьшает контакт поверхности резания с уже незащищённой фаской. Этот защитный эффект более значим с учётом прогиба поверхности резания при обработке материалов, образующих сливную стружку [6]. Использование СМП с покрытием TiCN для черновой обработки, когда допустимый износ по задней поверхности может быть увеличен до $h_3 = 0,7$ мм, даёт увеличение стойкости в 2,9 раза (рис. 2).

На рис. 3 приведена зависимость длины фаски износа по задней поверхности h_3 [мм] от времени резания t [мин] при обработке стали 40X СМП с износостойким покрытием WNMG080404-ТМ при различных скоростях резания.

При использовании СМП без покрытия при скорости резания $v = 300$ м/мин износ $h_3 = 0,3$ мм наступает через 18 мин; при использовании СМП с покрытием TiCN при скорости резания $v = 300$ м/мин износ $h_3 = 0,3$ мм наступает через 45 мин;

При использовании СМП WNMG080404-ТМ с покрытием при скорости резания $v = 360$ м/мин износ $h_3 = 0,3$ мм наступает через 17 мин; при использовании СМП WNMG080404-ТМ с покрытием при скорости резания $v = 180$ м/мин износ $h_3 = 0,3$ мм наступает через 102 мин;

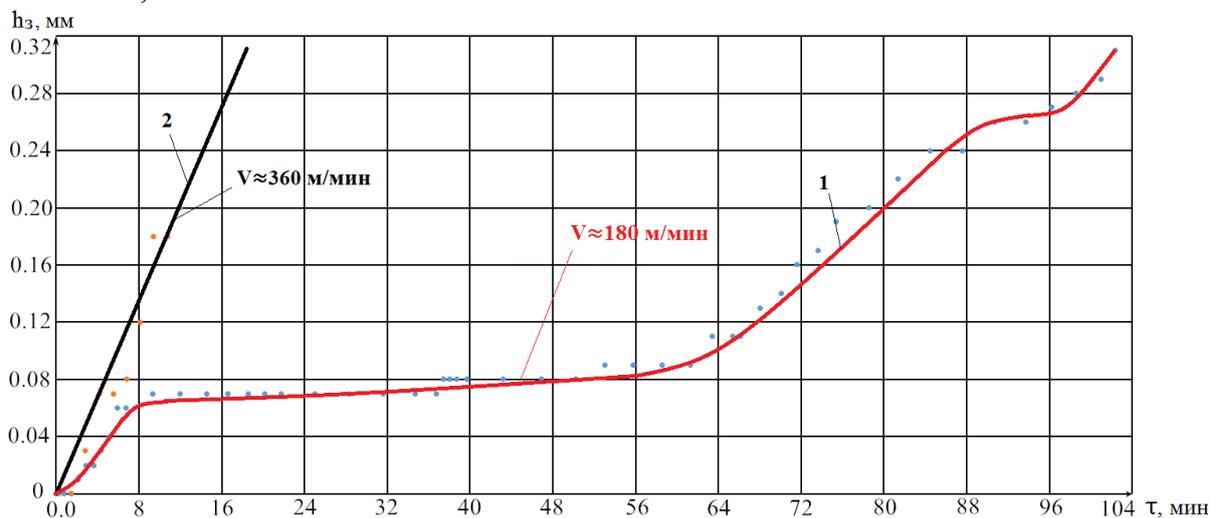


Рис. 3. Изменение длины фаски износа по задней поверхности h_3 [мм] от времени резания при обработке стали 40X СМП с износостойким покрытием WNMG080404-ТМ. $s = 0,13$ мм/об, $t = 1$ мм. 1 – $v = 180$ м/мин; 2 – $v = 360$ м/мин

При точении стали 40X СМП WNMG080404-ТМ с покрытием со скоростью $v = 180$ м/мин после 64 мин работы на режущей кромке в области контакта с необработанной поверхностью появляется местный износ (так называемый «ус»), который на рис. 4 указан стрелкой.



Рис. 4. Локальный износ режущей кромки (ус). $v=180$ м/мин, $t = 1$ мм, $s = 0,13$ мм/об $h_z=0,31$ мм

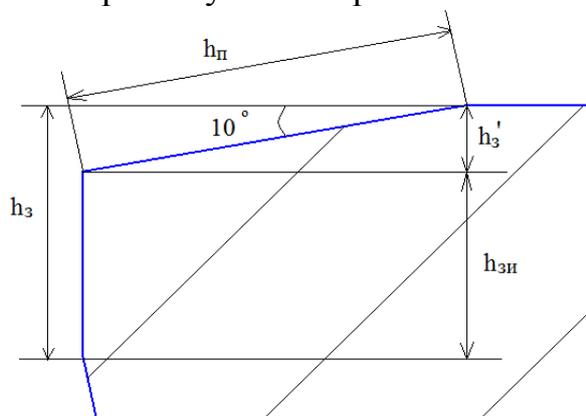


Рис. 5. Нормальное сечение режущей пластины в области местного износа. $v=180$ м/мин, $t = 1$ мм, $s = 0,13$ мм/об, $h_z=0,31$ мм

По нашему мнению это связано с окислением покрытия и удалением окислов в процессе обработки, в том числе и на передней поверхности, что приводит к появлению отрицательного переднего угла $\gamma = -10^\circ$ (рис. 5). В этом месте износ протекает гораздо интенсивнее, стружка перестаёт дробиться на полукольца и короткие витки. Сливная путанная стружка начинает обвиваться вокруг державки и заготовки.

После 95 мин точения стружка практически сразу же обвивается вокруг заготовки и начинает вращаться вместе с ней, что вынуждает останавливать обработку и удалять стружку. Иногда этот моток стружки отлетает и попадает в оператора. Это явление очень травмоопасно, поэтому после 98-102 мин точения мы были вынуждены прекращать обработку и заменять вершину СМП. При работе на станке с защитным экраном оператор всё равно вынужден временно прекращать обработку для удаления стружки, т.к. вращающийся моток стружки может привести к поломке инструмента или даже станка. При обработке на станке с ЧПУ или на автоматической линии такое явление тем более недопустимо. Поэтому стойкость СМП WNMG080404-ТМ с покрытием при скорости резания $v = 180$ м/мин и подаче СМП WNMG080404-ТМ с покрытием со скоростью $v = 180$ м/мин принимаем равной 102 мин.

Заключение

1. Внутренние напряжения в режущем клине инструмента с износостойким покрытием TiCN уменьшаются на 16% по сравнению с режущей пластиной без покрытия.

2. Наибольшие внутренние напряжения в самом покрытии на 27 % больше, чем в твёрдосплавной пластине без покрытия, что связано с небольшой толщиной покрытия.

3. При точении стали 40X со скоростью резания 300 м/мин и подачей 0,07 мм/об стойкость пластин T15K6 с покрытием TiCN превосходит стойкость контрольных пластин T15K6 без покрытия в 2,5-2,9 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента [Текст] / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. - Старый Оскол : ТНТ, 2011. - 379 с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-94178-251-2 (в пер.)
2. Современные инструментальные материалы / Ю. М. Зубарев . – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2014 . – 304 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература) . - ISBN 978-5-8114-0832-0.
3. Верещака А.С., Дачева А.В., Аникеев А.И. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава / Известия МГТУ «МАМИ» № 1(9), 2010. с. 99-106.
4. Kozlov Victor Nicolaevich, Zhang Jiayu, Guo Yingbin, Sabavath Sai Kiran. Contact loads on surfaces of worn out cutter in steel machining [Electronic resource] / Zhang Jiayu [et al.]; sci. adv. V. N. Kozlov // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов : сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 16-18 мая 2018 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2018. — [С. 39-45].
5. V. Kozlov, J.Y. Zhang, J. Cui, M. Bogolyubova. Split Cutter Method for Contact Stresses Research over Flank Surface of a Cutter [Electronic resource] / V. N. Kozlov [et al.] // Key Engineering Materials : Scientific Journal. — 2017. — Vol. 743 : High Technology: Research and Applications (HTRA 2016). — [P. 258-263].