

## ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.941

### ТОЧЕНИЕ ПОКРЫТИЙ С АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

*канд. техн. наук Ю.А. МЕЛЬНИЙЧУК, д-р техн. наук С.А. КЛИМЕНКО  
(Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев)*

*Рассмотрена разработка процесса точения газотермических износостойких покрытий с аморфно-кристаллической структурой, состав которых соответствует эвтектическим системам типа Fe - В, Fe - Cr - В, Fe - Si - В. Представлены результаты исследования закономерностей процесса резания напыленных аморфно-кристаллических покрытий, основные особенности изнашивания режущего инструмента из поликристаллических сверхтвёрдых материалов. Показаны возможности по технологическому управлению качеством обработанной поверхности в процессе точения покрытий с различным содержанием аморфной фазы.*

**Введение.** Относительно новым направлением в развития методов газотермического напыления является использование материалов, которые склонны к образованию в условиях напыления аморфной структуры [1]. Такие покрытия характеризуются специфическими физико-механическими свойствами - имеют высокие износо- и коррозионную стойкость, прочность сцепления с основой, что делает перспективным их применения в разных областях техники.

В то же время использование на деталях с высокими требованиями к качеству поверхности и размерной точности покрытий с аморфно-кристаллической структурой (ПАКС) в настоящее время ограничено. Одной из причин, которые сдерживают использования покрытий с аморфно-кристаллической структурой в промышленности, является недостаточность научно обоснованных рекомендаций по их производительной и качественной механической обработке, в частности точением. Требование обязательного сохранения исходного содержимого аморфной фазы в ПАКС, которое обуславливает их эксплуатационные свойства, накладывает определенные ограничения на процессы механической обработки таких покрытий.

В технической литературе имеется ограниченное количество работ, связанных с механической обработкой газотермических ПАКС. При этом данные по точению ПАКС практически отсутствуют, а применительно к процессу шлифования отмечается, что выполнение условия сохранения исходного содержимого аморфной фазы в покрытиях ведет к значительному снижению производительности процесса обработки.

Анализ работ по механической обработке покрытий показывает, что одной из главных причин, которые препятствуют получению в процессе механической обработки состояния покрытия, требуемого по условиям эксплуатации изделия, является неоднородность напыленного материала. В настоящее время практически отсутствуют расчетные методики определения в процессе резания покрытий температурно-силовых закономерностей, показателей механики и физико-химии изнашивания инструмента, которые учитывали бы гетерогенность обрабатываемого материала.

Отсутствие обоснованных рекомендаций приводит к неправильному выбору технологии обработки покрытий, назначения режимов резания и режущего инструмента и, как следствие, к экономическим потерям. Появление новых материалов защитных покрытий, в частности, экономнолегированных порошковых материалов на основе железа, которые склонны к аморфизации в условиях напыления, требует совершенствования технологий их обработки, что обуславливает необходимость проведения глубоких теоретических и экспериментальных исследований.

Изучение закономерностей процесса резания покрытий с учетом влияния наличия в их структуре аморфной фазы и определение степени гетерогенности их структуры количественными характеристиками позволит предложить эффективные пути технологического управления качеством поверхности изделий с ПАКС.

**Методика экспериментов.** Объектом исследования были газотермические покрытия с аморфной структурой. Покрытия толщиной 1... 1,6 мм напылялись на сталь 45 газопламенным и электродуговым методами с применением порошков и порошковых шнуров, состав которых отвечал эвтектическим системам типа Fe - В, Fe - Si - В, Fe - Cr - В. Твердость покрытий - 52...58 HRC.

Для точения покрытий использовался инструмент с неперетачиваемыми многогранными пластинами из поликристаллического сверхтвёрдого материала (ПНТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) марки «киборит».

Исследования структуры материала покрытий проводились с использованием положений фрактального формализма. В качестве количественной характеристики структуры покрытий принята величина фрактальной размерности совокупности механических свойств материала  $D$ . Для ее оценки разработана специальная методика, основанная на результатах склерометрирования. Значения фрактальной размерности  $D$  определялись клеточным методом по данным трибограмм с использованием программы для ПЭВМ «Fractal analysis».

Температура резания определялась экстраполяцией на вершину резца температур нагрева двух точек на опорной поверхности режущей пластины, экспериментально полученных с помощью хромель-копелевых термопар.

Исследования структуры и фазового состава покрытий проводились металлографическим, рентгеноструктурным и рентгеноспектральными методами, а также с использованием электронной микроскопии. Содержимое аморфной фазы в структуре покрытий определялось по методике Б.К. Ванштейна.

Оценка параметров шероховатости поверхности производилась на профилографе-профилометре «Talysurf-5» фирмы Renk Taylor-Hobson (Великобритания).

Общий вид изношенных инструментов, химический состав напыленных покрытий и продуктов взаимодействия инструментально материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды исследовались на растровом электронном микроскопе «Camskan-4DV» с приставкой для энерго дисперсионного рентгеноспектрального анализа «Link-860» (Великобритания).

Обработка выполнялась с режимами резания:  $v = 0,5...3,0$  м/с;  $S = 0,01...0,3$  мм/об;  $t = 0,05...0,6$  мм инструментом со следующими геометрическими параметрами:  $\gamma = 0^\circ...20^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ$ ;  $\sigma_r = 30...60^\circ$ ;  $\sigma_p = 15^\circ$ .

**Результаты исследований и их обсуждение.** Использование традиционного расчетно-аналитического метода определения величины оптимального припуска на обработку [2] не позволяет учесть специфику методов и условий нанесения конкретного вида покрытия. Изучение изменения микротвердости и содержания аморфной фазы в структуре покрытия, шероховатости обработанной поверхности на разном расстоянии от основы показало, что ПАКС характеризуются неодинаковыми свойствами по глубине. Наиболее высокие и стабильные свойства имеют слои покрытия на уровне 0,4...0,8 мм от основы. Эта величина и обуславливает глубину резания, так как величина припуска при точении должна выбираться таким образом, чтобы к обработанной поверхности готового изделия прилегали наиболее твердые и однородные слои покрытия.

Исследование микроструктуры обрабатываемого материала показало, что ПАКС в зависимости от вида напыленного материала и условий напыления имеют разную структуру, но общим для них являются наличие аморфной и кристаллической фаз, которые имеют различные механические свойства. Присутствие нескольких структурных составляющих обуславливает структурную неоднородность напыленных покрытий этого класса. В свою очередь структурная неоднородность покрытий существенно влияет на их обрабатываемость резанием.

Количественная оценка обрабатываемости резанием гетерогенных материалов может быть выполнена с учетом положений теории фракталов [3], которая позволяет охарактеризовать исследуемый объект параметрами, независимыми от масштаба их оценки. В качестве такой характеристики целесообразно использовать фрактальную размерность  $D_0 = D_s + D_p$ , где  $D_s$  и  $D_p$  – соответственно фрактальная размерность совокупности механических свойств и совокупности ординат профиля поверхности покрытия. При чистой обработке макронеровности на поверхности удаляемого слоя материала имеют незначительную величину и существенно не влияют на глубину резания и, соответственно, на сам процесс резания. В этом случае величиной  $D_p$  правомерно пренебречь, а обрабатываемость определять по величине  $D_s$ , которая характеризует нестабильность свойств материала с гетерогенной структурой.

Для ПАКС наблюдается тесная связь между величиной  $D_s$  и количеством аморфной фазы, с уменьшением которого неоднородность структуры покрытий возрастает.

Неоднородность структуры покрытий существенно влияет на шероховатость обработанной поверхности. Анализ зависимости  $Ra = f(D_s)$  показывает (рис. 1), что как при обработке одного типа покрытий, характеризуемых разными значениями  $D_s$ , так и при обработке разных материалов наблюдается общая тенденция – более качественная поверхность достигается при

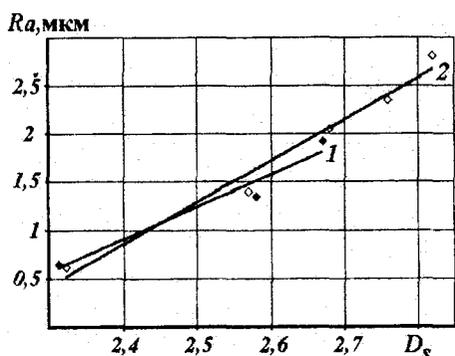


Рис. 1. Зависимость шероховатости обработанной поверхности ( $Ra$ ) от величины фрактальной размерности ( $D_s$ ) напыленных покрытий ( $v = 1,2$  м/с;  $S = 0,05$  мм/об;  $t = 0,15$  мм;  $h_3 = 0,1$  мм):  
1 – газопламенное порошковое покрытие  $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ ;  
2 – гамма газопламенных порошковых покрытий систем Fe – В и Fe – Cr – В

обработке покрытий, структура которых характеризуется меньшими величинами  $D_s$ , а по величине  $D_s$  можно оценивать обрабатываемость резанием ПАКС по критерию шероховатости обработанной поверхности.

Изменение режимов резания при обработке покрытий, характеризуемых величиной  $D_s = 2,6...2,85$ , не приводит к существенному изменению высоты микронеровностей и не позволяет получить точением поверхности с низкой шероховатостью, что связано с высокой гетерогенностью структуры таких покрытий. В процессе точения формируется стружка надлома, имеет место выкрашивание и осыпание отдельных, слабо деформированных при напылении частиц покрытия.

Тем не менее при точении газопламенных покрытий, напыленных из порошка  $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$  ( $D_s = 2,31 \pm 0,016$ ) и из порошкового шнура  $Fe_{80}B_{20}$  ( $D_s = 2,32 \pm 0,012$ ), варьирование условиями обработки позволяет существенно приблизить микрогеометрию поверхности к такой, которая требуется условиями эксплуатации.

Методом планирования экспериментов получено уравнение регрессии условий точения покрытия, напыленного порошком  $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ , на высоту микронеровностей  $Ra$ :

$$Ra = 0,00041S^{0,22}h_3^{0,33}(90 - \gamma)^{1,85}v^{9-1,94\ln(90-\gamma)},$$

анализ которого показывает, что наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности покрытия оказывают передний угол инструмента, величина фаски износа инструмента по задней поверхности и подача.

Существующие аналитические расчеты температуры резания и параметров тепловых полей в зоне резания [4] могут достаточно эффективно использоваться в случае обработки сплошных материалов. В покрытиях содержатся фазы с разными теплофизическими свойствами, характер расположения которых является случайным. Фронт теплового поля во время обработки покрытий распространяется по фазам с высокой теплопроводностью и имеет сложный фрактальный характер.

На основе предположения о том, что структура исследуемых ПАКС состоит из фрагментов, имеющих конечную и нулевую (поры) теплопроводность, и использования зависимостей, описывающих построение регулярного фрактала - триадной кривой Коха, получена зависимость для определения коэффициента теплопроводности гетерогенного напыленного покрытия:

$$\lambda' = \frac{dQ}{(0,04)^{1-D_f} \text{grad}\theta \, dF \, d\tau} = \frac{\lambda_{\text{сущ}}}{(0,04)^{1-D_f}},$$

где  $\lambda_{\text{сущ}}$  - коэффициент теплопроводности аналогичного по химическому составу сплошного материала;  $D_f$  - фрактальная размерность фронта теплового поля.

Сравнения экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о том, что предложенный подход позволяет более точно провести теплофизический анализ процесса резания неоднородных материалов, используя методику, аналогичную применяемой при обработке монолитных материалов. Расхождение с экспериментальными значениями температуры не превышает 10 %.

Экспериментальные исследования позволили оценить влияние скорости резания, подачи и износа инструмента на температуру резания при точении ПАКС. Уравнение регрессии для покрытия, напыленного порошком  $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ , имеет вид:

$$T = 747,7v^{0,484}S^{(0,034-0,012\ln v)}h_3^{0,077-0,044\ln v}.$$

Результаты рентгеноструктурных исследований показывают, что при точении в диапазоне скоростей резания  $v = 0,7...2,7$  м/с и при величине износа режущего инструмента  $h_3 < 0,3$  мм в обрабатываемых покрытиях не происходит структурно-фазовых превращений. Теоретический расчет скорости охлаждения покрытия после прохождения режущей кромки подтверждает отсутствие предпосылок для протекания процессов кристаллизации в обрабатываемом материале в широком диапазоне условий точения.

С возрастанием величины износа  $h_{i,j} > 0,3$  мм при обработке со скоростью резания  $v > 1,5$  м/с покрытий, которые характеризуются высоким содержанием аморфной фазы (АФ) (больше 70 %), наблюдается некоторое его уменьшение в поверхностных слоях обрабатываемого материала. Анализ рентгенограмм с обработанной поверхности покрытия показывает, что при износе резца до величины  $h_{i,j} \sim 0,4$  мм содержание АФ снижается на 13 %, что связано с изменением напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала в зоне обработки. С ростом изнашивания инструмента увеличиваются силы резания, в особенности сила  $P_y$ , что приводит к повышению их влияния на структуру обрабатываемого материала, которое проявляется в частичной кристаллизации аморфной составляющей. После обработки покрытий изношенным резцом с более низкими скоростями резания (0,7...1,5 м/с) в обрабатываемом материале не наблюдается снижение содержания аморфной фазы.

Полученные результаты показывают, что только одновременное высокоинтенсивное влияние как температурного, так и силового факторов процесса резания приводит к частичной кристаллизации в по-

верхностных слоях обрабатываемых ПАКС с высоким содержанием аморфной фазы (рис. 2). Оценить такое влияние можно по величине мощности резания  $N_a$  (критерий, ограничивающий процесс резания), превышение которой приводит к фазовым изменениям в поверхностном слое обрабатываемого материала.

Для газопламенных покрытий, напыленных из порошкового шнура  $Fe_8O_2B_2O$  и порошка  $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ ,  $A'_d$  составляет 1100 Вт.

При обработке покрытий с невысоким содержанием АФ (< 50 %) изменение ее количества не установлено.

Износ режущего инструмента при точении ПАКС с высоким содержанием АФ происходит как по задней, так и по передней поверхностям, а в случае обработки покрытий с более гетерогенной структурой и значительно меньшим содержанием аморфной составляющей инструмент преимущественно изнашивается по задней поверхности.

В зависимости от условий обработки и геометрических параметров инструмента его изнашивание обусловливается комплексом факторов: механическим разрушением, абразивным, адгезионным и химическим взаимодействием между контактирующими материалами и действием элементов окружающей среды. При обработке ПАКС со скоростью резания  $v < 1,5$  м/с изнашивание инструмента носит преимущественно абразивно-механический характер, действие которого усиливается с возрастанием содержания твердых включений в материале покрытия.

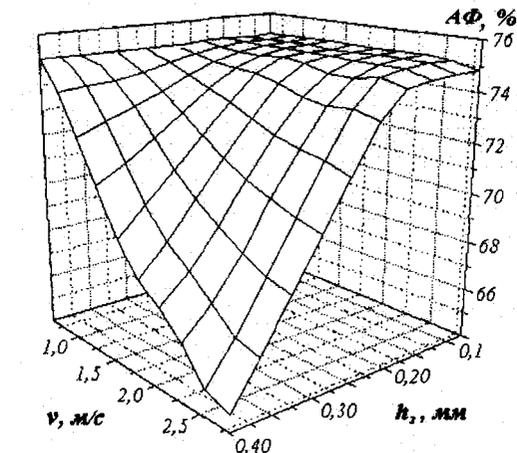


Рис. 2. Зависимость содержания аморфной фазы в газопламенном покрытии, напыленном порошком  $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ , от скорости резания ( $v$ ) и износа инструмента ( $h_3$ ) ( $S = 0,05$  мм/об;  $t = 0,15$  мм)

Повышение гетерогенности структуры покрытий в таких условиях приводит к осыпанию режущей кромки резца вследствие возрастания ударных нагрузок на инструмент. При обработке со скоростью резания  $v > 1$  м/с имеет место интенсивный массоперенос обрабатываемого материала на контактные поверхности режущего инструмента. При точении высокоаморфизированных (больше 70 % АФ) покрытий со скоростями резания 1 ... 1,5 м/с на рабочих поверхностях инструмента формируется плотный слой налипшего материала (налет), защищающий контактные поверхности инструмента от воздействия обрабатываемого материала и тем самым способствующий снижению интенсивности изнашивания инструмента. Образованию налета способствует пластичная аморфная составляющая материала покрытий. Его периодическое удаление обуславливает процесс адгезионного изнашивания инструмента. Своеобразный налет на неконтактных поверхностях инструмента при точении со скоростью резания больше 2 м/с подтверждает наличие между инструментальным и обрабатываемым материалом химического взаимодействия, жидкие продукты которого в процессе резания выносятся за пределы участка контакта.

Нужно отметить, что химическое взаимодействие между контактирующими инструментальным и обрабатываемым материалами при обработке покрытий, в состав которых не входит хром, в исследуемом диапазоне условий обработки имеет низкую интенсивность. При температурах, которые развиваются в процессе точения с высокими скоростями резания, процесс изнашивания инструмента интенсифицируется в результате окисления инструментального материала.

Интенсивность изнашивания инструмента и, как следствие, его стойкость в значительной мере определяются однородностью структуры обрабатываемого материала. Повышение степени гетерогенности структуры ПАКС приводит к ускоренному изнашиванию инструмента (рис. 3), что связано прежде всего с интенсификацией ударных нагрузок на лезвие инструмента и возрастанием нестабильности самого процесса резания. При увеличении скорости резания влияние неоднородности структуры ПАКС на стойкость инструмента снижается, что определяется как изменением характера изнашивания инструмента, так и динамических условий резания.

При точении покрытий с содержанием АФ > 70 % со скоростями резания  $v = 1,2...1,7$  м/с инструмент, оснащенный ПСТМ «киборит», имеет высокую стойкость ( $T \sim 60$  мин при  $h_3 = 0,25$  мм), которая в два раза превышает стойкость инструмента при обработке ПАКС, характеризующихся невысоким содержанием (< 50 %) аморфной фазы.

С увеличением гетерогенности структуры обрабатываемого материала процесс точения ПАКС целесообразно проводить с более высокими скоростями резания, что обуславливает повышение производительности и снижение себестоимости обработки.

Учитывая результаты исследований шероховатости обработанной поверхности и стойкости режущего инструмента, величину  $D_s$  правомерно использовать в качестве характеристики, которая определяет обрабатываемость покрытий резанием (рис. 4) [5].

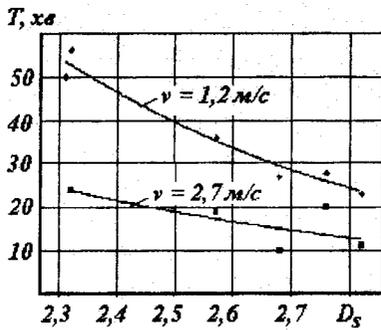


Рис. 3. Зависимость стойкости инструмента  $T$  ( $h_3 = 0,25$  мм) от величины ( $D_s$ ) ряда покрытий ( $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,2$  мм)

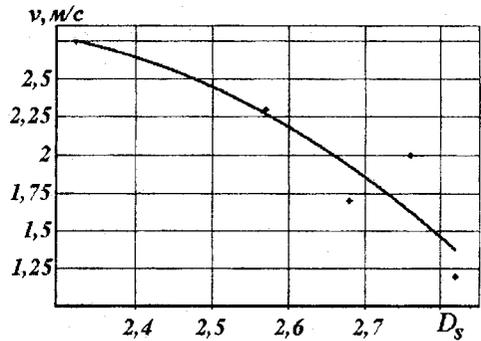


Рис. 4. Влияние величины ( $D_s$ ) ряда покрытий на скорость резания  $v$  ( $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,2$  мм), при которой обеспечивается стойкость инструмента  $T = 23$  мин ( $h_3 = 0,25$  мм)

### Выводы

1. Использование положений фрактального формализма позволяет количественно оценить обрабатываемость резанием гетерогенных напыленных покрытий с аморфно-кристаллической структурой и учесть гетерогенность структуры покрытий при теплофизическом анализе процесса резания.
2. В процессе точения режущим инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ, с величиной износа  $h_3 < 0,3$  мм отсутствуют предпосылки для протекания процессов кристаллизации в обрабатываемом материале под действием температурно-силовых условий процесса резания.
3. Процесс обработки ПАКС ограничивается величиной предельной мощности резания, превышение которой приводит к снижению содержания аморфной фазы в поверхностном слое обрабатываемого материала.
4. Интенсивность изнашивания режущего инструмента в разных температурно-силовых условиях процесса точения напыленных ПАКС систем Fe - В, Fe - Cr - В и Fe - Si - В обуславливается механическим разрушением, абразивным, адгезионным и химическим взаимодействием инструментального материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды. С ростом скорости резания влияние неоднородности структуры покрытий на интенсивность изнашивания инструмента снижается.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коржик В.М. Наукові і технологічні основи газотермічного напылення аморфізованих покриттів з металевих сплавів: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук. - Київ: ІЕЗ НАН України, 1999. - 35 с.
2. Северилов В.С. Полонський Л.Г., Клименко С.А. Теоретичні основи технології механічної обробки: Навч. посібн. - Житомир: ЖІТІ, 2002. - 272 с.
3. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. - М.: Наука, 1994.-384 с.
4. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. - М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.
5. Спосіб визначення відносної оброблюваності матеріалів / С.А. Клименко, Ю.О. Мельничук, Ю.О. Муковоз, М.Ю. Копейкіна // Декларційний патент України 67468 А, бюл. // Промислова власність. - 2004. - № 6.