

УДК 621.793

Оптимизация архитектуры многослойных износостойких наноструктурированных покрытий

Курочкин А. В.

*Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва,
РГАТУ, ул. Пушкина, 53, Рыбинск, 152934, Россия
e-mail: oki@rgata.ru*

Аннотация

Предложена оптимизация архитектуры многослойного износостойкого наноструктурированного покрытия монокристаллических твердосплавных концевых фрез, применяемых для изготовления деталей современных авиационных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов, менее подверженного деформационным нагрузкам на основе разработки математических моделей оценки напряженно-деформированного состояния покрытий. Приводятся исследования дефектации многослойных покрытий с целью выявления наиболее рациональных архитектур многослойных покрытий применительно к монокристаллическим твердосплавным концевым фрезам.

Ключевые слова: монокристаллические концевые фрезы, многослойные износостойкие наноструктурированные покрытия, дефектация покрытий, оптимизация

Износостойкие покрытия нашли широкое распространение в производстве современных авиационных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов. Таким образом, одним из самых эффективных способов создать защиту детали от эрозионного, коррозионного воздействия или высокой температуры является применение твердого износостойкого покрытия. Твердые износостойкие покрытия - класс покрытий, которые применяются для повышения стойкости режущих инструментов. Применение данных покрытий предполагает, что они являются чрезвычайно твердыми, износостойкими и имеют низкий коэффициент трения. В свою очередь, свойства износостойких покрытий зависят от состава и легирующих добавок в покрытии, а толщина и

структура покрытий – еще один параметр, характеризующий их свойства. Толщина покрытий может изменяться от нескольких нм до 100 мкм, а структура может быть как однослойной, так и многослойной [1]. Таким образом, создание покрытий для режущего инструмента нового поколения наиболее эффективно осуществлять при использовании инновационной концепции многослойно-композиционной архитектуры с нанометрической структурой и чередующимися слоями наноразмерной толщины различного композиционного состава и функционального назначения [2].

Износостойкие покрытия стали неотъемлемой частью современных инструментальных материалов, и большинство современных инструментов снабжены тем или иным покрытием. Технология нанесения позволяет придать им характеристики, необходимые для конкретных условий обработки, и гарантировать, что покрытие эффективно дополняет физико-механические свойства основы из твёрдого сплава. Варьируя состав и толщину покрытия, можно создавать универсальные в применении твёрдые сплавы для разных обрабатываемых материалов и операций.

Такие инструменты имеют повышенную поверхностную твердость и теплостойкость, хорошую сопротивляемость окислительным и коррозионным процессам, низкую склонность к адгезии с обрабатываемым материалом, более стабильные прочностные свойства. Наиболее эффективны современные наноструктурированные многослойные покрытия, обеспечивающие в большинстве технологических ситуаций существенное увеличение эксплуатационных характеристик режущего инструмента.

Использование режущего инструмента с покрытием требует грамотного подхода не только к его производству, но и эксплуатации. Это связано с несколькими аспектами.

1. Инструмент с покрытием существенно дороже обычного, что требует экономического анализа его применения.

2. При выборе состава и метода нанесения покрытия (рис. 1) необходимо учитывать не только физико-механические свойства образованного композит-

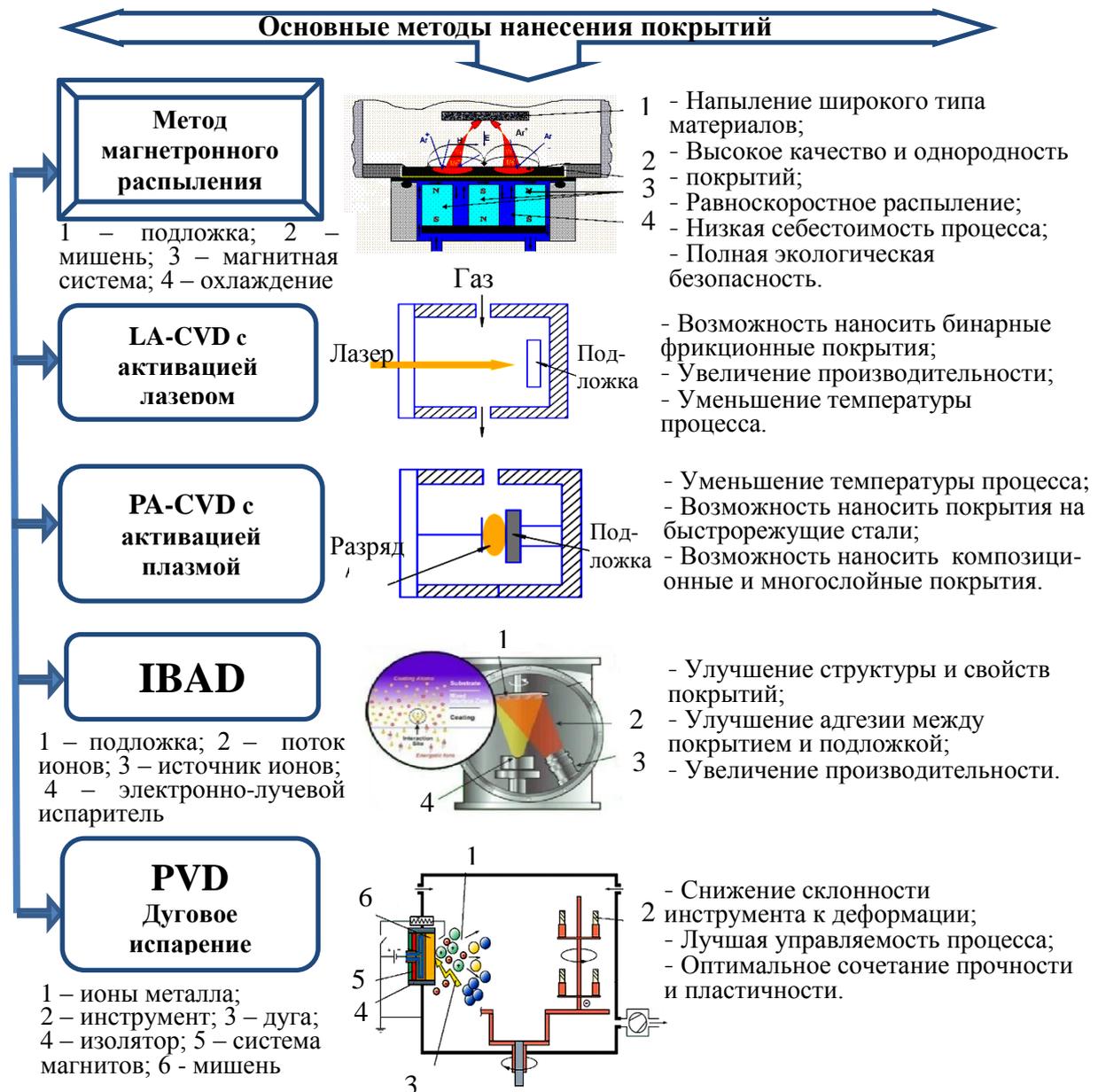


Рис. 1. Основные методы нанесения покрытий

ного режущего клина, кристаллохимическую совместимость материалов слоев покрытия и основы, технологические параметры процесса нанесения и т.п., но также и характер контактирования обрабатываемого материала и инструмента в процессе резания.

3. Отсутствие надежных математических моделей не позволяет достоверно прогнозировать наиболее эффективное покрытие с точки зрения триботехнических характеристик зоны контакта, а известные экспериментальные методы слишком трудоемки

для широкого практического использования. Причем сложность воспроизводства в адгезиометрах реальных условий контакта при резании заставляет осторожно подходить к результатам таких экспериментов.

4. Одним из важнейших условий эффективной эксплуатации инструмента с покрытиями является его использование лишь в соответствующей области рациональных технологических условий обработки. В то же время использование покрытий на режимах обработки, характерных для работы инструментом без покрытия, может дать непредсказуемый, а зачастую – и отрицательный эффект.

Так как износостойкие покрытия являются защитой основного материала, то важно не только проектировать структуру покрытия, чтобы минимизировать повреждение основания, но также понять механизмы отказа в пределах системы «покрытие-подслой-подложка».

Для прогнозирования дефектации многослойных покрытий с целью ее предотвращения, произведено исследование механизма разрушения твердых износостойких покрытий с промежуточным пластичным подслоем, подверженных нагрузке. Анализ производился методом конечных элементов (МКЭ), чтобы оценить напряжения, вызывающие разрушение покрытия. Кроме того, исследование состояло в исследовании влияния свойств материалов многослойного покрытия на процесс разрушения системы «подложка-покрытие». Также было уделено внимание структуре многослойного покрытия, когда состав слоев и толщина каждого слоя влияют на рабочие характеристики покрытий. Различные исследователи [3-4] оценивали структуру многослойных покрытий посредством проведения многочисленных экспериментов, предлагая лучшие композиции. Необходимо предложить оптимальные структуры покрытий, основанные на расчетных моделях, чтобы минимизировать поиск, основанный на опытах.

Для оценки дефектации покрытий была рассмотрена двумерная конечно-элементная модель растрескивания системы «покрытие –подслой– подложка» под действием растягивающей нагрузки. Представленная модель являлась составной, представляющей собой твердое износостойкое покрытие с промежуточным слоем титана и твердосплавным основанием. Для изучения распределения напряжений и образования трещин свойства материала покрытия и промежуточного слоя были выбраны различными. Распределение напряжений неравномерно через всю толщину покрытия. Для решения данной задачи использовался программный комплекс ABAQUS6.1 предназначенный для конечно-элементных прочностных расчетов, с помощью которого можно получать точные и достоверные решения для самых сложных линейных и нелинейных инженерных проблем. Моделируемая система состоит из: однородного и изотропного покрытия толщиной $2,5 \cdot 10^3$

нм; подложки, представляющей собой твердый сплав, толщиной в 200 раз больше чем покрытие; промежуточного слоя титана между покрытием и основанием толщиной 20 нм. Согласно рассматриваемой модели покрытие является однородным вдоль всей толщины. Основание подложки было ограничено в перемещении, а растягивающая нагрузка была приложена по краям подложки. Смещения происходят только в подложке и промежуточном слое.

Установлено, что внутренние напряжения и граничные условия на целом сегменте покрытия таковы, что покрытие подвергается значительному изгибу. Изгиб покрытия приводит к возникновению сжимающих напряжений, вызывающих развитие трещины вблизи поверхности раздела. Сжимающие напряжения, которые фиксируются вблизи поверхности покрытия, тормозят развитие трещин возникающих из поверхности раздела. Из модели на рисунке 2 видно, что даже при увеличении напряжений, количество трещин на поверхности покрытия не увеличилось, зато с ростом напряжений (рис. 2 (б)) трещины образованные вблизи поверхности претерпевают рост. Если бы покрытие исследовалось от вершины (как при исследовании сканирующим электронным микроскопом), то модель показала, что развития трещин с увеличением напряжений не происходит.

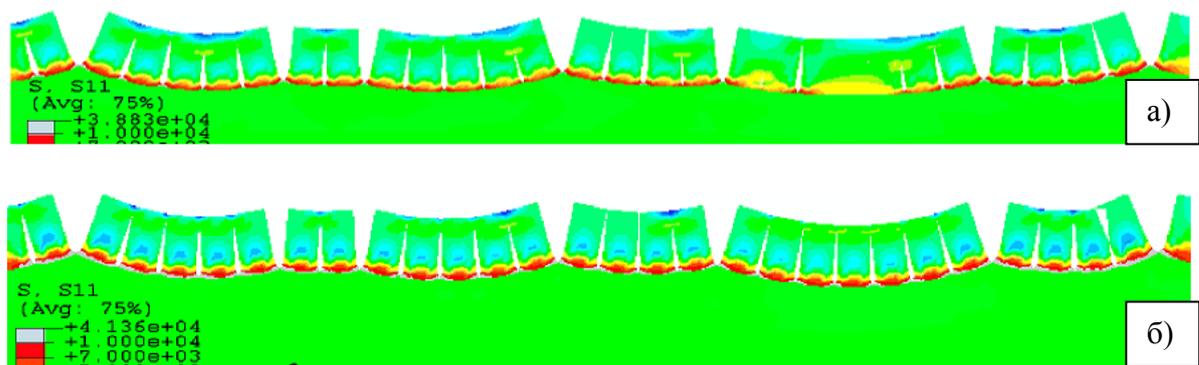


Рис. 2. Трещины в покрытии. Модель 1 а) - образование трещин; б) - торможение трещин при росте деформации

Проведенный анализ свидетельствует, что растрескивание в покрытия чувствительно к свойствам материала покрытия и промежуточного слоя. Модель также демонстрирует формирование трещин на поверхности покрытия, показывая, что новые трещины не появятся на поверхности с увеличением деформации растяжения. Проведенное моделирование показывает, что, не смотря на то, что рост трещины может происходить вблизи поверхности покрытия, могут появиться внутренние трещины, которые не распространились полностью к поверхности покрытия.

В текущей модели дальнейшее деформирование системы «покрытие-подслой-подложка» в конечном итоге приведет к распространению трещин к поверхности покрытия. В действительности, напряженное состояние такой системы не является одноосным, под действием напряжений возникают трещины направленные под углом 45° к имеющимся трещинам в покрытии [5].

Количество искривления и изгиб покрытия, возникающий в приграничных областях, из-за податливости основания также стоит учитывать. Изгиб покрытия по поверхности раздела в конечном случае может привести к отслоению покрытия. Величина изгибающего момента является функцией зависящей от геометрии и свойств материалов покрытия, промежуточного слоя, и основания.

С увеличением модуля упругости покрытия, происходит рост растягивающих напряжений при той же деформации, следовательно, происходит увеличение изгибающего момента, который приводит к искривлению покрытия. Варианты изгиба покрытия между двумя трещинами в зависимости от свойств покрытия и подслоя представлены на рисунках 3 и 4.

Рассмотренные модели позволили оценить реакцию системы «покрытие-подслой-подложка» на возникающие растягивающие напряжения. Из проведенного анализа видно, что зарождение трещины происходит в поверхности раздела с последующим ее распространением к поверхности покрытия, и часто останавливается около поверхности покрытия из-за наличия сжимающих напряжений. Система «покрытие-подслой-подложка» чувствительна к свойствам входящих в нее компонентов, что дает возможность принять меры по оптимизации покрытия.

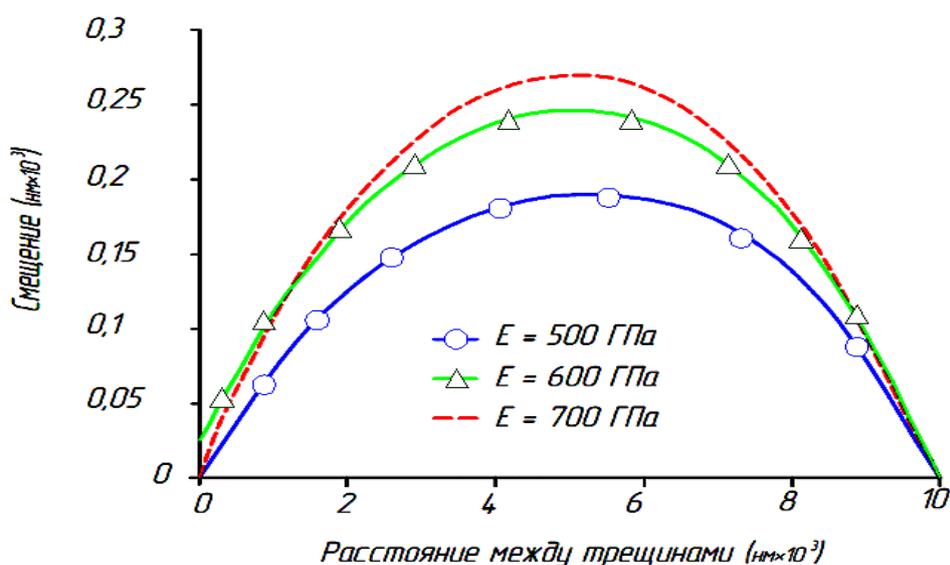


Рис. 3. Искривление покрытия в зависимости от модуля упругости

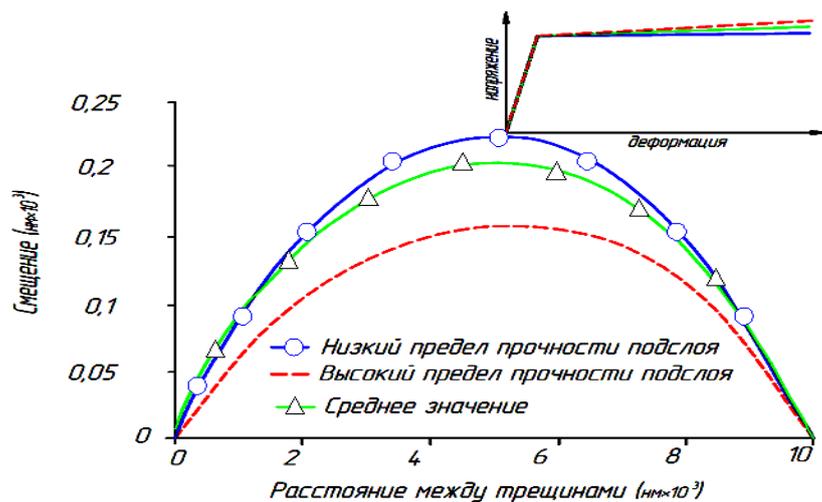
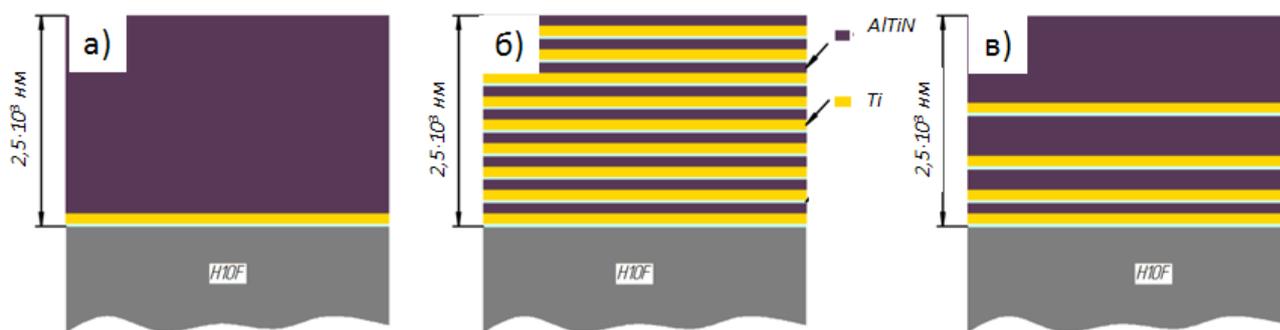


Рис. 4. Искривление покрытия в зависимости от предела прочности подслоя.

Как уже было сказано, системы покрытий являются склонными к разрушению из-за возникающих трещин в покрытии и деформаций подложки. Разрушения в системах покрытий в основном состоят из когезионных и межфазовых расслаиваний. Когезионный отказ в покрытии происходит, когда коэффициент энерговыведения для дефектов в покрытии превышает вязкость разрушения покрытия. Точно так же разрыв в поверхности раздела (покрытия и подложки) происходит, когда коэффициент энерговыведения для дефектов в поверхности раздела превышает межфазную вязкость разрушения. Разрушение тонких твердых покрытий - это целый комплекс, зависящий от материала покрытия, подложки и промежуточного слоя, который связывает систему вместе.

Чтобы получить сведения о рабочих характеристиках многослойных покрытий, были смоделированы многослойные архитектуры покрытий (рис. 5) в условиях контактного взаимодействия со сферическим индентором. Для моделирования данных условий методом конечных элементов использовался программный комплекс прочностного анализа ABAQUS 6.1. Наименьший размер ячейки покрытия равен 25 нм. Вся система была ограничена в перемещении в горизонтальном и вертикальном направлениях.



AlTiN	2,45 мкм	AlTiN	200нм (10 слоев)	AlTiN	300 нм, 500 нм, 700 нм, 900 нм
Ti	50нм	Ti	50нм (10 слоев)	Ti	50 нм (4 слоя)

Рис. 5. Архитектура исследуемых покрытий

Индентор представляет собой твердый шар радиусом 250 мкм, контакт между индентором и покрытием был установлен при помощи контактных алгоритмов ABAQUS с коэффициентом трения между шаром и покрытием равным 0,1. Толщина покрытия равнялась $2,5 \cdot 10^3$ нм, и считалось, что оно было однородным, изотропным и упругим. Свойства материала подложки были выбраны для твердого сплава H10F, материал покрытия AlTiN. В литературе существует различные значения модуля упругости для покрытия AlTiN, этот диапазон варьирует от 300 ГПа до 600 ГПа. Для текущего моделирования модуль упругости AlTiN был выбран равным 500 ГПа. Сопротивление разрыву для покрытия было выбрано равным 3000 МПа.

В результате моделирования установлено, что при двухслойной архитектуре покрытия возникают максимальные нормальные напряжения, а минимальные напряжения наблюдаются в покрытии, состоящем из слоев с изменяющейся толщиной слоев AlTiN. Кроме того, нормальные напряжения в слоях Ti для всех случаев являются сжимающими.

Двумерные конечно-элементные модели позволили имитировать реакцию многослойной системы покрытие-подслой-подложка в различных ее вариациях на нагружение, характеризующее работу режущего инструмента. Из проведенного анализа следует, что многослойное покрытие общей толщиной 2,5 мкм состоящее из восьми чередующихся слоев Ti (играющего роль демпфирующего слоя) и AlTiN с изменяющейся толщиной каждого слоя, выдерживает наибольшую нагрузку и менее подвержено разрушению.

Рассмотренные модели позволили оценить реакцию системы «покрытие-подслой-подложка» на возникающие растягивающие напряжения. Из проведенного анализа видно, что зарождение трещины происходит в поверхности раздела с последующим ее распространением к поверхности покрытия, и часто останавливается около поверхности покрытия из-за наличия сжимающих напряжений. Система «покрытие-подслой-подложка» чувствительна к свойствам входящих в нее компонентов, что дает возможность принять меры по оптимизации покрытия.

При управлении механической обработкой монолитными твердосплавными концевыми фрезами с покрытием приходится решать сложную задачу оптимизации: необходимо соотнести критерии, характеризующие свойства покрытия с физическими процессами, происходящими в зоне резания.

Инструменты с многослойными наноструктурированными покрытиями имеют во много раз более высокий ресурс стойкости, зачастую при более высоких характеристиках резания, и отличаются высоким и стабильно воспроизводимым уровнем производительности. При этом центральная роль принадлежит покрытиям, поэтому для повышения работоспособности монолитных твердосплавных концевых фрез необходим подбор максимально стойкого покрытия, следовательно, в качестве критерия оптимизации следует выбрать граничный симплекс отслоения покрытия, физический смысл которого заключается в нахождении оптимального соотношения силы адгезионного отслаивания и силы резания, при котором покрытие не претерпевает отслоение.

Преимущества данного критерия оптимизации заключаются не только в его первостепенной важности для повышения ресурса использования инструмента с покрытием, но и в том, что этот критерий наиболее полно и комплексно учитывает структуру покрытия и технические условия процесса обработки монолитными твердосплавными концевыми фрезами с покрытием.

Среди элементов оказывающих влияние на граничный симплекс отслоения покрытия можно выделить две группы. Первую группу составляют элементы характеризующие покрытие и его свойства; вторую – элементы технологической операции, т.е. выбранные режимы обработки:

$$k_{II} = f(h_{II}, n, \sigma, s_z, t, b)$$

где k_{II} – граничный симплекс отслоения покрытия; h_{II} – толщина n слоя многослойного покрытия, м; n – количество слоев многослойного покрытия; σ – напряжения, возникающие в покрытии; P_a ; v – скорость резания, м/с; s_z – подача на зуб,

мм/зуб; t – глубина резания, м; b – ширина среза, м.

Данную функциональную зависимость можно представить в виде:

$$k_{\Pi} = \frac{F_{адз}}{P_z}$$

где $F_{адз}$ – сила адгезионного отслаивания покрытия от подложки, Н; P_z – сила резания;

Для определения силы адгезионного отслаивания многослойного покрытия от подложки $F_{адз}$, введем допущение, что между слоями покрытия отсутствует когезионное растрескивание и адгезионное отслаивание за счет высокой адгезионной и когезионной стойкости каждого дискретного участка, следовательно отслоение может произойти только в поверхности раздела всего покрытия и подложки. В связи с этим, согласно исследованию главы 3 можно записать

$$F_{адз} = k_{сл} \cdot \sigma \cdot S$$

где σ – напряжения, возникающие в покрытии; Па; S – площадь покрытия под индентором, м²; $k_{сл}$ – коэффициент слоистости многослойного покрытия, равный

$$k_{сл} = \frac{\sum_1^n \frac{h_{\Pi}}{h_{\Pi} - h_{\Pi n}}}{n}$$

где h_{Π} – общая толщина многослойного покрытия ; м; $h_{\Pi n}$ – толщина n слоя многослойного покрытия, м; n – количество слоев многослойного покрытия.

Площадь S определим, рассматривая проекцию внедренной части индентора в поверхность покрытия в виде сегмента (рис. 6)

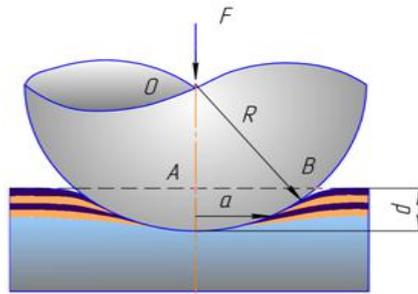


Рис. 6. Схема внедрения индентора в поверхность покрытия

Из рисунка 6 видно, что площадь контакта будет равна площади сферической части поверхности шарового индентора внедренного в поверхность покрытия, т.е.

$$S = 2\pi R d$$

где R – радиус индентора, м; d – глубина индентирования, м;

Следовательно получим выражение для определения усилия, приводящего к отслаиванию многослойного покрытия от подложки:

$$F_{адг} = 2\pi \cdot \sigma \cdot R \cdot d \cdot \frac{\sum_1^n \frac{h_{II}}{h_{II} - h_{III}}}{n}$$

Выражение граничного симплекса отслоения покрытия k_{II} после уточнения некоторых его составляющих можно представить в следующем виде:

$$k_{II} = 2\pi \cdot \sigma \cdot R \cdot d \cdot \frac{\sum_1^n \frac{h_{II}}{h_{II} - h_{III}}}{n \cdot P_z}$$

Анализируя граничный симплекс отслоения покрытия, можно заметить, что при работе на черновых режимах (при высоких силах резания) покрытие

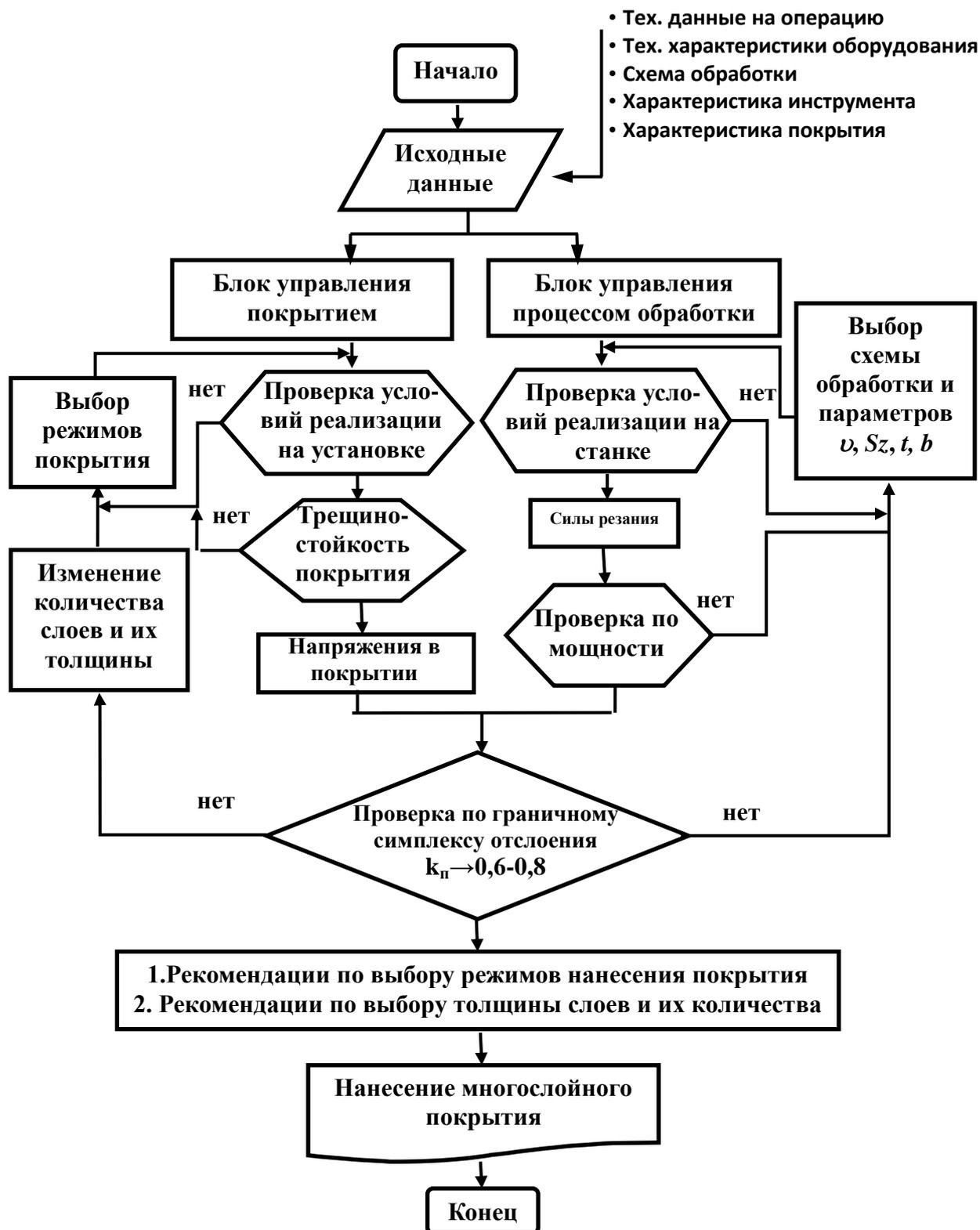


Рис. 7. Схема оптимизации процесса нанесения многослойного износостойкого наноструктурированного покрытия

отслаивается с режущей кромки, и дальнейшая обработка осуществлялась практически без покрытия. При работе с низкими значениями силы резания (чистовая обработка) стойкость покрытия к отслаиванию увеличивается, и покрытие работает на истирание. Следовательно,

существует переходный уровень силы резания, ниже которого покрытие работает на истирание ($k_{II} < 1$), а выше которого сила резания превышает силу адгезионного сцепления покрытия с подложкой, вследствие чего происходит отслоение покрытия ($k_{II} > 1$).

Разработанная методика (рис. 7) позволяет рационально выбрать архитектуру многослойного покрытия для конкретного процесса обработки определенной группы обрабатываемого материала и определить режимы резания для достижения максимальной стойкости инструмента с покрытием. Достоинством методики является то, что она обеспечивает подбор покрытия оптимизированного по слоистости, для достижения его наибольшей стойкости на инструменте, что дает возможность увеличить количество переточек применяемого инструмента, продлить период стойкости инструмента между переточками и повысить качество обрабатываемой поверхности, используя возможности многослойного износостойкого покрытия и станочного оборудования.

Библиографический список

1. Кожина, Т. Д. Перспективы развития производства режущего инструмента с наноструктурными покрытиями [Текст] / Т. Д. Кожина // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 4.
2. Курочкин, А.В. Технологические особенности многофункциональных наноструктурированных покрытий для режущего инструмента [Текст] / А.В. Курочкин // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТА, 2010. – № 3 (18). – С. 166-172.
3. Leyland A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour [Текст] / A. Leyland, A. Matthews // Wear. - 2000.- P.1-11.
4. Matthews A. S. Franklin, and K. Holmberg, Tribological coatings: contact mechanisms and selection [Текст] /A. Matthews, S. Franklin, K. Holmberg // Journal of Physics D-Applied Physics. - 2007.- 40(18).- P. 63-75.
5. Subramanian, C. Review of Multicomponent and Multilayer Coatings for Tribological Applications [Текст] / C. Subramanian, K.N. Strafford // Wear,-1993.-165.-P.85-95.