

УДК 621.891

© Али Юсупович АЛБАГАЧИЕВ, Ильдар Ринатович БАИШЕВ
**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С
 ФУЛЛЕРЕНАМИ И НАНОКОРБИДОМ ВОЛЬФРАМА**

*Московский государственный университет приборостроения и информатики
 Москва, Россия.*

ildar.baishev@mail.ru

Аннотация: В данной статье рассмотрены перспективы применения материалов на основе фуллеренов и нанокорбида вольфрама для повышения стойкости режущего инструмента. Проведен анализ причин низкой износостойкости протяжного инструмента при обработке жаропрочных сталей и сплавов. Рассмотрены различные варианты технологий использования материалов на основе фуллеренов и корбида вольфрама для повышения износостойкости инструмента. Приведены результаты эксперимента по нанесению частиц нанокорбида вольфрама на поверхность режущего инструмента.

Ключевые слова: *протягивание, жаропрочный сплав, износ, стойкость, фуллерены.*

**APPLICATION PROSPECTS OF MATERIALS BASED ON FULLERENES FOR
 INCREASING RESISTANCE OF BROACHING TOOL**

Albagachiev Ali Yusupovich, Baishev Ildar Rinatovich

Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics, Moscow.

Повышение эффективности производства в машиностроении на современном этапе развития техники — это, прежде всего увеличение производительности и уменьшение себестоимости, при сохранении или повышении качества, надежности и конкурентоспособности изделия. Особенно это важно при производстве ответственных деталей весьма сложных и наукоемких газотурбинных двигателей (ГТД). Все эти критерии во многом зависят от конкретных технологических процессов изготовления отдельных деталей, определяющих показатели эффективности изготовления изделий в целом. К таким определяющим технологическим процессам, относятся процессы протягивания сложных фасонных поверхностей деталей из различных труднообрабатываемых сталей и сплавов. Часто- это единственно возможный способ обработки, например, при протягивании елочных пазов в дисках турбин, изготавливаемых из жаропрочных сплавов на никелевой и железо-никелевой основах. Протягивание таких деталей с использованием быстрорежущих протяжек на низких скоростях резания не более 2,0-4,0 м/мин не удовлетворяет требованиям производства ни по производительности обработки, ни по стойкости протяжек, ни по стабильности качества получаемой поверхности.

При протягивании труднообрабатываемых материалов основное время выполнения операции протягивания имеет малые значения, тогда как время на наладку протяжного станка может в несколько раз превышать время выполнения операции протягивания.

$$t_{осн} = t_{наз} \cdot n_{наз} \cdot n_{дисков} = 0,7 \cdot 70 \cdot 1 = 49 \text{ мин} \quad (1)$$

$$K = \frac{t_{осн}}{t_{наладки} + t_{осн}} \cdot 100\% = \frac{49}{480 + 49} \cdot 100\% = 9,2\% \quad (2)$$

$t_{наз}$ - машинное время выполнения операции,

$t_{наз}$ - машинное время для протягивания одного паза ,

$t_{наладки}$ - время наладки горизонтально-протяжного станка,

$t_{наладки}$ - доля основного времени выполнения операции протягивания пазов диска турбины,

$n_{дисков}$ - количество обработанных дисков до переточки, $n_{наз}$ - количество пазов в одном диске.

Как мы видим, основное время выполнения составляет лишь 9,2% [2] от общего времени выполнения операции протягивания. Откуда следует, что одной из основных проблем повышения производительности и снижения себестоимости обработки пазов дисков газовых турбин является стойкость протяжного инструмента.

Определим ключевые факторы влияющие на стойкость и производительность инструмента.

1. Высокоточная обработка инструмента.

К пазам дисков турбин предъявляются очень высокие требования по точности. Так, например, линейный допуск на поверхность елочного паза составляет 0,003-0,005.

Для обеспечения такой точности требуется обработка с очень маленькой подачей от 0,02 мм/зуб, при этом радиус скругления зуба протяжки составляет 0,01-0,02 мм, что сравнимо с подачей. В связи с этим, возникают ситуации когда зуб не срезает слой металла, а подминает его задней поверхностью. Возникают повышенные напряжения, действующие на заднюю поверхность, возрастает сила трения, что негативно сказывается на стойкости инструмента.

2. Высокая прочность материала заготовок.

Предел прочности жаропрочных сталей составляет от 1000 МПа до 1600 МПа, тогда как для обычной стали 45 он равен 470 МПа (закалка). Вследствие этого силы резания, действующие на инструмент в 3-4 раза выше, чем при обработке конструкционных сталей. Что приводит вместе с низкой скоростью резания к возникновению пятен адгезии, а как следствие к выкрашиванию материала инструмента.

3. Наличие интерметаллических и карбидных включений в материале заготовки.

Для повышения жаропрочных свойств при изготовлении сплавов в них добавляют различные добавки - титан, молибден, вольфрам и другие. Данные включения имеют повышенную твердость и прочность. Размер данных включений составляет 0,3-0,4 мкм. Что вносит в процесс резания дополнительные случайные изменения, приводящие к выкрашиванию зубьев протяжки, ухудшению шероховатости передней и задней поверхности.

4. Переменный характер силы резания и ударные нагрузки.

При протягивании пазов количество зубьев, участвующих в резании, периодически изменяется - 3 или 4 зуба. Также, при врезании зуб испытывает ударные нагрузки. Все это приводит к колебаниям параметров процесса резания, вибрациям системы СПИД.

5. Повышенное выделение тепла.

Из-за высоких сил трения по передней и задней поверхности инструмента образуется очень большое количество теплоты. Жаропрочная сталь имеет низкий коэффициент теплопроводности, что затрудняет отвод тепла из зоны резания. Также, затруднена подача СОЖ непосредственно в зону резания, вследствие геометрической формы и размеров пазов.

Произведем расчет параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца. Воспользуемся расчетом приведенном в монографии [1]:

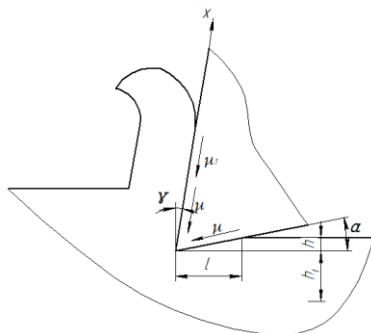


Рис. 1. Схема процесса резания.

$$\sigma_h = -1,55\sigma_s \left(\sin^2\gamma + \mu(1 - \operatorname{tg}\gamma) + \frac{u(0,5 + \mu)}{k_c} - \mu\sin 2\gamma \right) \quad (3)$$

$\gamma = 10^\circ$ - передний угол протяжки из быстрорежущей стали P18,

$\sigma_s = 700 \text{ МПа}$ - напряжение текучести для стали ХН77ТЮР,

$\mu = 0,5$ - коэффициент трения по напряжению текучести по задней поверхности,

$k_c = 1,9$ - коэффициент усадки стружки.

σ_s - напряжение текучести

$$\sigma_h = -1,55 \cdot 700 \cdot \left(\sin^2 10^\circ + 0,5 \cdot (1 - \operatorname{tg} 10^\circ) + \frac{1 \cdot (0,5 + 0,5)}{1,9} - 0,5 \sin 20^\circ \right) = -865 \text{ МПа}$$

$$h = -1,55 \frac{\sigma_s}{E} h_1 \left(\sin^2\gamma + \mu(1 - \operatorname{tg}\gamma) + \frac{u(0,5 + \mu)}{k_c} - \mu\sin 2\gamma \right) \quad (4)$$

$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ - модуль Юнга,

$h_1 = 20 \text{ мм}$ - размер до недеформируемой части материала,

$h_1 = 20 \text{ мм}$ - глубина углубления задней поверхности инструмента в материал заготовки,

$$h = -1,55 \frac{700}{2 \cdot 10^5} \cdot 20 \left(\sin^2 10^\circ + 0,5(1 - \operatorname{tg} 10^\circ) + \frac{1 \cdot (0,5 + 0,5)}{1,9} - 0,5 \sin 20^\circ \right) = 0,053 \text{ мм}$$

$$l = \frac{h}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (5)$$

l - длина площадки контакта,

α - задний угол инструмента,

$$l = \frac{0,053}{\operatorname{tg} 3^\circ} = 1,01 \text{ мм}$$

$$F = \frac{\sigma_h}{b_h} \quad (6)$$

F - сила давления на заднюю поверхность,

b - ширина срезаемого слоя,

$$F = 865 \cdot 1,01 \cdot 10 = 8736,5 \text{ Н}$$

Как мы видим сила давления на заднюю поверхность составляет 8736,5Н. При такой силе возникает большое количество пятен адгезии, существенно влияющих на силу резания.

Экспериментально установлено, что в первую очередь изнашивается задняя поверхность зубьев протяжки. Выделим основные два вида износа, определяющих низкую стойкость инструмента:

- абразивный – связан с наличием интерметаллических включений, имеющих повышенную твердость,

- адгезионный – связан с высоким значением сжимающих напряжений, воздействующих на заднюю поверхность зуба протяжки.

Следовательно, для увеличения износостойкости целесообразно применение защитной среды для инструмента, к которому необходимо предъявить следующие требования:

- защита поверхности инструмента от выкрашиваний материала, связанного с наличием твёрдых включений,

- снижение поверхностной энергии материала инструмента и тем самым уменьшение силы взаимодействия материалов инструмента и заготовки.

Данным требованиям удовлетворяют различные материалы на основе фуллеренов и наноматериалов.

Фуллерены - молекулярное соединение, принадлежащее классу аллотропных форм углерода и представляющее собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из чётного числа трёх координированных атомов углерода. Были открыты в 1985 году группой

учёных - Робертом Кёрлом, Харольдом Крото, Ричардом Смолли, Хисом и О'Брайеном. Они обладают рядом замечательных свойств, превосходящих все существующие материалы. Наиболее распространенная и доступная на сегодняшний день форма фуллеренов - C_{60} . Именно они могут быть получены в требуемом для промышленности объеме при приемлемой цене.

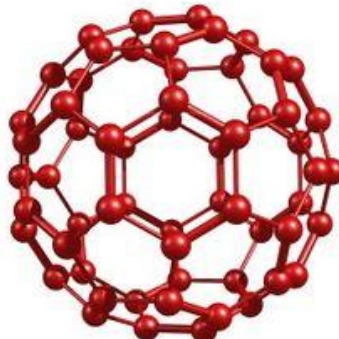


Рис. 2. Молекула фуллерена C_{60} .

Применение фуллеренов в машиностроении можно разделить на три направления:

- использование фуллеренов в качестве присадки к смазке,
- нанесение фуллереновых покрытий,
- образование алмазных пленок за счет использования фуллеренов в качестве катализаторов,

При нормальном давлении фуллериты C_{60} представляют собой мягкие кристаллы со слабым ван-дер-ваальсовым взаимодействием между молекулами с плотностью около $1,6 \text{ г/см}^3$ и объемным модулем сжатия $B \sim 18 \text{ ГПа}$. Диаметр молекулы фуллерена составляет $0,71 \text{ нм}$.

Фуллерены отличаются высокой химической инертностью по отношению к процессу мономолекулярного распада. Так, молекула C_{60} сохраняет свою термическую стабильность вплоть до 1700К . Однако в присутствии кислорода, окисление этой формы углерода до CO и CO_2 наблюдается уже при существенно более низких температурах - порядка 500К . Экспериментально установлено [2], что при скорости резания равной 2 м/мин температура возникающая в очаге деформации не превышает 800К , но в данном случае доступ к кислороду в зоне резания будет отсутствовать, что говорит о допустимости применения фуллеренов.

Наиболее распространенным и дешёвым способом применения является добавление фуллереновой сажи в смазочные материалы. Для её растворения в минеральном масле используются ультразвуковые диспергаторы. Положительное действие фуллерена в качестве добавки к смазочному маслу связывается с шарообразной формой его молекул, способствующей реализации поворотных мод деформирования в трибоконтакте. Также его высокая активность, облегчает как создание защитного антифрикционного слоя на поверхности трения, так и проникновение молекул фуллерена в поверхностные слои трущихся материалов, что облегчает процессы структурной самоорганизации при трении. Основным достоинством данного способа является его дешевизна и относительно высокая эффективность. Недостатком является, то невысокая концентрация фуллеренов в в зоне резания из-за труднодоступности подведения СОЖ.

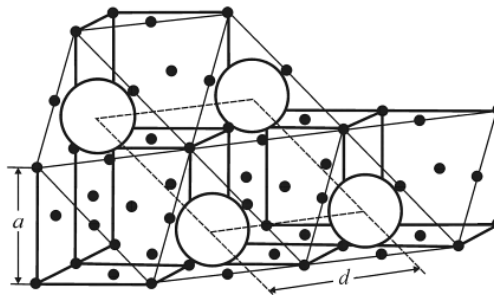


Рис. 3. Распределение фуллеренов по поверхности.
 $a = 0,35\text{нм}$ - параметр кристаллической решетки жаропрочного сплава,
 $d = 0,71\text{нм}$ - параметр кристаллической решетки фуллерена.

Нанесение фуллеренов на поверхность режущей части инструмента возможно несколькими способами:

1- Термическое распыление в вакууме.

Металл-фуллереновые плёнки обычно получают методом термического распыления в вакууме. Поскольку фуллерены начинают сублимировать при температурах ниже 500 К, а температура испарения металлов значительно выше, то для получения плёнок используют два испарителя. Концентрация фуллеренов в плёнках определяется скоростями поступления компонентов (атомов и молекул), которые регулируются температурой испарителей и их расположения относительно подложки. Температуры испарителей выбираются по экспериментальным зависимостям скорости испарения от температуры. Тем самым мы можем контролировать параметры, определяющие физико-механические характеристики покрытия.

2- Электрохимическое осаждение.

Для получения толстых металлических плёнок с небольшим (менее 1 %) содержанием фуллеренов может использоваться метод электрохимического осаждения, при котором порошок фуллерита или раствор фуллеренов смешивается с электролитом. Для повышения однородности электролита используется ультразвуковой вибратор. Технологическими параметрами являются состав электролита, плотность и режим тока, мощность, длительность импульсов и частота сопутствующего лазерного излучения.

3- Нанесение покрытия сверхзвуковым молекулярным пучком молекул фуллеренов.

В силу высокой способности к адгезии к большинству материалов, возможно нанесение фуллеренов методом сверхзвукового молекулярного пучка обогащенного молекулами фуллеренами.

Применение фуллеренов в качестве покрытия режущего инструмента дает ряд преимуществ:

- Снижение поверхностной энергии инструмента, а следовательно снижение сил межмолекулярного взаимодействия.
- Проникновение молекул фуллерена в поверхностные слои трущихся материалов облегчает процессы структурной самоорганизации при трении.
- Снижение сил контактного взаимодействия материала инструмента и заготовки. За счет шарообразной формы молекул фуллерена, энергия контактных напряжений перераспределяется и рассеивается.
- Улучшение рассеивания тепловой энергии.

Основным недостатком нанесения покрытий перед использованием фуллеренов в качестве добавки к СОЖ является более высокая трудоёмкость, необходимость использования сложных технических средств.

При обработке фуллеритов высокими давлениями и температурами удается синтезировать целый спектр кристаллических и разупорядоченных фаз углерода с плотностями, лежащими в диапазоне от "фуллеритных" до "алмазных" и с высокими механическими характеристиками. Применение фуллеренов в качестве катализатора, для получения алмазов позволяет в несколько раз снизить необходимое для этого давление и температуру. Что также может использоваться для нанесения алмазных покрытий на режущую поверхность протяжного инструмента.

Использование наноматериалов, механические характеристики которых значительно отличаются от аналогичных, присущих традиционным, также как и применение фуллеренов имеет большие перспективы для использования в качестве износостойких покрытий.

Руководствуясь этим, было проведено исследование металлорежущего инструмента с содержанием наносоставляющих. При схожих химических составах с обычными твердыми сплавами возможны различия в износостойкости этих материалов и других свойствах. Для выявления различий были проведены эксперименты.

Испытания проводились на токарно-карусельном станке мод. 1512 с использованием СОЖ - 5% раствор эмульсола. В качестве инструмента использован проходной резец фирмы «Wickman» с механическим креплением четырехгранных пластин. Геометрические параметры главной режущей кромки были следующими: $\varphi = 75^\circ$; $\gamma = -5^\circ$; $\alpha = 5^\circ$; $\lambda = 5^\circ$, $r = 0,5$ мм. Были изготовлены режущие пластины из твердого сплава ВК8 с добавлением наноразмерного карбида вольфрама (WC) с нормальным распределением размеров частиц со средней величиной 12нм и средне-квадратичным отклонением ± 5 нм. Для изготовления пластин была использована новая технология с использованием высокоамплитудных ультразвуковых диспергаторов. В качестве пластификатора используется парафин, при этом осуществляется перемешивание в высокооктановом бензине. В результате получается гелевая структура с равномерным распределением нанопорошка и пластификатора. Далее следует стандартный процесс изготовления твердосплавных пластин. Были получены пластины с различным содержанием наносоставляющей: 1,0%; 2,0%; 5,0%; 10%. В качестве обрабатываемого материала использовались полученные путем раскатки заготовки корпуса из сплава ЭП 708-ВД (ХН62ВМЮТ-ВД). При испытаниях осуществлялась обработка диаметра 660 мм с горизонтального суппорта станка при частоте вращения планшайбы 8 об/мин, подаче 0,2 мм/об и глубине резания 4 мм. Длина прохода во всех экспериментах была равна 75 мм (суммарная длина резания 777 150 мм). Проход осуществлялся сверху вниз.

Анализируя полученные данные, был выведен график зависимости износа инструмента по задней поверхности от содержания карбида вольфрама Рисунок 4.

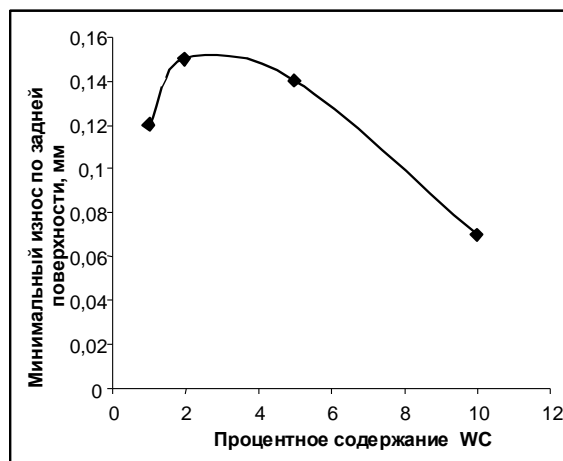


Рис. 4 – Кривая зависимости минимального износа по задней поверхности инструмента от процентного содержания наносоставляющей WC.

Из рис. 4 видно, что минимальный износ 0,07мм наблюдается по задней поверхности инструмента при 10% содержании WC.

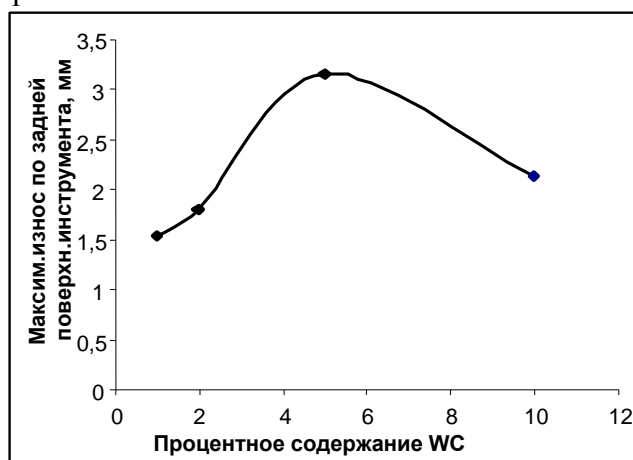


Рис. 5 - Кривая зависимости максимального износа по задней поверхности инструмента от процентного содержания наносоставляющей WC.

На рис.6 представлена зависимость величины износа передней поверхности инструмента от процентного содержания наносоставляющей карбида вольфрама.

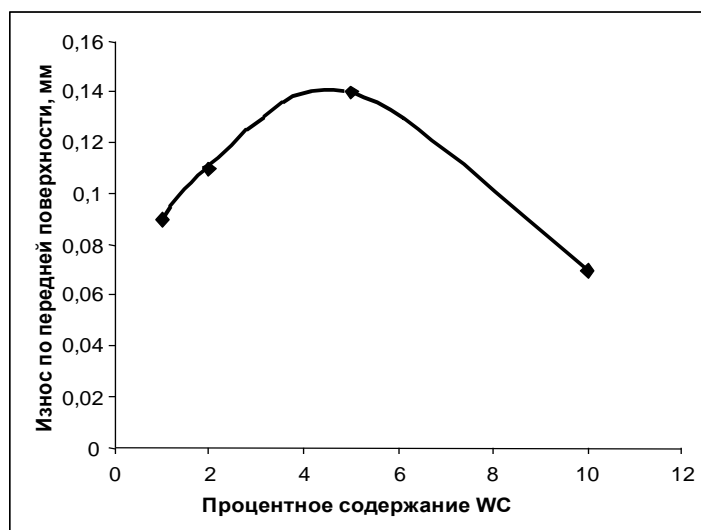


Рис.6 - Максимальный износ по передней поверхности в зависимости от содержания наносоставляющей WC

Следует отметить, что оптимальные значения процентного содержания WC для величины износа по передней и задней поверхности инструмента не совпадают. Для передней поверхности минимальный износ имеет место при 1% WC(рис.6), а для задней поверхности ее величина 10%.

Согласно результатам проведенных производственных испытаний можно заключить:

1. Испытанные новые режущие материалы обладают значительным различием адгезионных свойств по отношению к жаропрочному сплаву ЭП 708-ВД. К такому выводу приводит сравнение обработанных поверхностей, полученных при использовании пластин с различным содержанием наносоставляющей WC.

2. Согласно полученным результатам с ростом содержания наносоставляющей происходит уменьшение шероховатости и увеличение размерного износа и как следствие конусности обработанной поверхности.

3. Судя по характеру лунок износа на передней поверхности при использовании пластин с 5% и 10% содержанием наносоставляющей, процессы стружкозавивания и стружкоотвода существенно отличались от остальных случаев. Значительным был размерный износ, что привело к образованию конусности обработанной поверхности 0,5 мм для случая использования материала с 10% содержанием наносоставляющей и еще большей для случая использования материала с 5% содержанием наносоставляющей.

4. Характер налипания на задней поверхности и струйки застывшего обрабатываемого материала на передней поверхности свидетельствуют о высоких (соответствующих температуре плавления обрабатываемого материала) температурах, возникавших в процессе резания.

В ходе анализа полученных данных были выявлены парадоксальные явления - менее износостойкие пластины обеспечивают более низкую шероховатость. Данный факт требует более подробного изучения. Изменение толщины элементов стружки в процессе обработки происходит из-за изменения геометрии инструмента вследствие износа, исследование влияния этих изменений на силы резания и температуру в процессе резания так же мало изучено. Следовательно, применение новых материалов таких как, фуллерены и нанокарбид вольфрама в качестве износостойких покрытий требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Воронцов А.Л., Теоретические основы обработки металлов в машиностроении: монография / Воронцов А.Л., Албагачиев А.Ю., Султан-Заде Н.М., – Старый Оскол: «ТНТ», 2013. - 552 с.
2. Пронкин Н.Ф., Протягивание труднообрабатываемых материалов, методическое пособие / Пронкин Н.Ф., - Москва: «Машиностроение», 1978. – 119с.
3. Мастеров В.Ф., Физические свойства фуллеренов статья / Мастеров В.Ф., - Москва: «Физика» - 1997. – 7 с.