

Инструментальные покрытия при лезвийной обработке и критерии для их назначения

Г. Ю. Сапожников¹, А. А. Сазанов², С. Х. Хадиуллин³

¹ sapozhnikov.rep@mail.ru

¹⁻³ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНТ)

Аннотация. В статье рассматриваются физические основы адгезионных взаимодействий в процессе лезвийной обработки, их влияние на обрабатываемую поверхность и износостойкие инструментальные покрытия, а также общие требования к покрытиям и методы оценки влияния адгезионных связей.

Ключевые слова: лезвийная обработка; адгезия; высокотемпературный фрикционный контакт; установка; ускоренный метод; инструментальный материал; износостойкие покрытия; качество поверхности; контактные взаимодействия.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации современного высокотехнологичного металлорежущего оборудования показывает, что применение даже самых прогрессивных моделей станков с режущим инструментом несоответствующего качества и/или технологического назначения не позволяет обеспечить желаемых технико-экономических показателей, качества обработанной поверхности. Свойства режущего инструмента (РИ) в значительной степени влияют на процесс лезвийной обработки. Помимо того, жизненный цикл РИ заметно короче в сравнении с деталями и узлами металлообрабатывающего оборудования. Таким образом, обоснованно считать, что качество и рациональность назначения РИ первоочередно влияют на работоспособность всей технологической системы [1].

Важно отметить, что вышеуказанное влияние кратно возрастает в случае механической обработки, характеризующейся повышенными теплосиловыми параметрами: обработка высоколегированных, коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов [1]. При осуществлении операций с данными обрабатываемыми материалами (ОМ) наблюдаются ускоренный износ инструмента и, следовательно, уменьшенная стойкость. Таким образом, решение данной проблемы становится актуальной задачей для наиболее ответственных и массовых отраслей машиностроительного комплекса, а именно: авиадвигателестроительной, станкостроительной, приборостроительной, космической.

Опыт эксплуатации современного высокотехнологичного металлорежущего оборудования показывает, что применение даже самых прогрессивных моделей станков с режущим инструментом несоответствующего качества и/или технологического назначения не позволяет обеспечить желаемых технико-экономических показателей, качества обработанной поверхности. Свойства режущего инструмента (РИ) в значительной степени влияют на процесс лезвийной обработки. Помимо того, жизненный цикл РИ заметно короче в сравнении с деталями и узлами металлообрабатывающего оборудования. Таким образом, обоснованно считать, что качество и рациональность назначения РИ первоочередно влияют на работоспособность всей технологической системы [1].

Важно отметить, что вышеуказанное влияние кратно возрастает в случае механической обработки, характеризующейся повышенными теплосиловыми параметрами: обработки

высоколегированных, коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов [1]. При осуществлении операций с данными обрабатываемыми материалами (ОМ) наблюдаются ускоренный износ инструмента и, следовательно, уменьшенная стойкость. Таким образом, решение данной проблемы становится актуальной задачей для наиболее ответственных и массовых отраслей машиностроительного комплекса, а именно: авиадвигателестроительной, станкостроительной, приборостроительной, космической.

ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПРОЦЕСС ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

Современный уровень развития инструментальных материалов (ИМ) на сегодняшний день не обеспечивает возможности создания универсального РИ, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками, в том числе стойкости, при разнообразных условиях эксплуатации: каждая марка ИМ предназначена для конкретных условий работ, что определяется ее физико-механическими свойствами. К тому же процесс разработки нового ИМ – долгосрочный, трудо- и наукоемкий процесс, сопровождающийся значительными финансовыми издержками [1]. Однако увеличение стойкости РИ достигается не только за счет свойств ИМ.

Известно, что независимо от условий и типа лезвийной обработки поверхностный слой РИ является наиболее нагруженным, а его свойства в значительной степени влияют на работоспособность инструмента. Поэтому на настоящий момент приоритетным направлением дальнейшего развития является разработка методов, связанных с улучшением свойств поверхностных слоев РИ, среди которых активно разрабатываются и применяются износостойкие инструментальные покрытия (ИП) [1].

Покрытие существенно увеличивает стойкость РИ при эксплуатации, комплексно повышает производительность лезвийной обработки, качество и точность обрабатываемых поверхностей, улучшает экономические показатели производства [1]. Кроме того, нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент позволяет осуществлять экологически безопасную обработку, исключая или ограничивая применение СОТС [2].

В качестве основы износостойких покрытий зачастую используется нитрид титана в сочетании с легирующими элементами: молибденом, алюминием, цирконием, кремнием, хромом. Применение иных легирующих добавок не нашло широкого распространения ввиду отсутствия экономической целесообразности либо несоответствующих физико-химических свойств. Также, кроме нитридов, в качестве основы инструментальных покрытий используются качественно отличающиеся соединения тугоплавких металлов: карбиды, карбонитриды, бориды и др. [3]. Так, карбидам и боридам свойственны более высокая твердость и термодинамическая стабильность, а нитридам – химическая инертность к широкому спектру обрабатываемых материалов, что играет важную роль при использовании в условиях повышенных термомеханических нагрузок [1].

Исследования процесса лезвийной обработки с использованием инструментальных покрытий показывают, что важнейшими критериями формирования покрытий являются учёт рабочих условий и параметров резания, а также выполнение требований, предъявляемых к РИ, для чего необходимо понимание процесса износа инструмента с покрытием, сведения о тепловом и напряженном состоянии системы «инструмент–покрытие» [3].

Нанесение покрытия также сопровождается изменением геометрических параметров инструмента, что необходимо заранее учитывать при назначении ИП. В частности, экспериментально полученные фотографии микрошлифа зуба метчика показывают значительное увеличение радиуса закругления режущей кромки (РК) ρ – до 100–200% (рис. 1) [1].

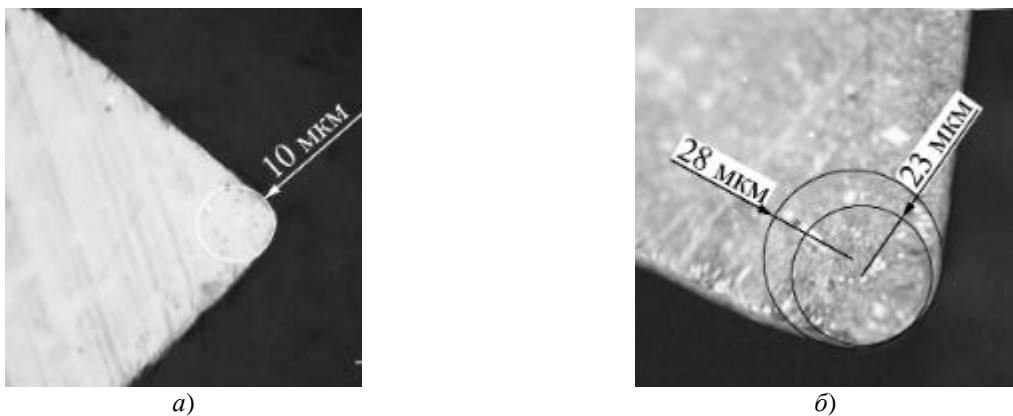


Рис. 1 Фотографии микрошлифа зуба метчика: до нанесения покрытия (а) и после нанесения (б)

Показанное изменение геометрии РИ носит неоднозначный характер влияния на процесс лезвийной обработки. Так, применительно к черновой обработке, увеличенный радиус закругления РК существенно повышает прочность и стойкость инструмента; применительно к чистовой обработке кратное увеличение ρ , прямо пропорционального минимально возможной толщине срезаемого слоя, оказывает негативное влияние на точность и качество обработанной поверхности [1].

Увеличение радиуса закругления РК также оказывает влияние на обработку пластичных материалов (рис. 2).

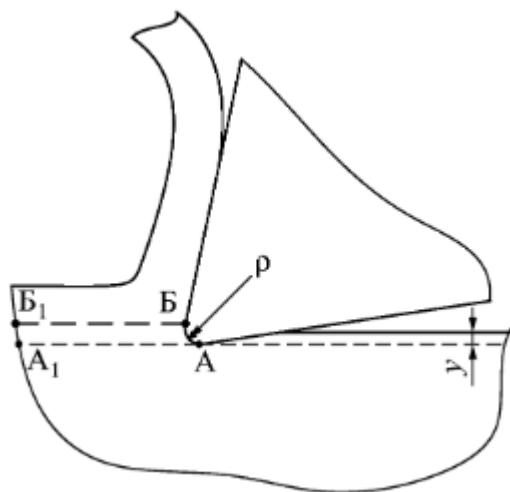


Рис. 2 Влияние радиуса закругления РК на деформационные процессы в поверхностном слое обработанной поверхности

На рис. 2 показаны линии требуемого ($A-A_1$) и фактического ($B-B_1$) резания. С увеличением радиуса закругления РК ρ линия разделения ОМ смещается вверх, что приводит к пластическим деформациям материала заготовки под линией $B-B_1$. Упругая деформация, предшествующая пластической, релаксирует после прохождения РИ и в дальнейшем осуществляет подъем обработанной поверхности на величину упругого последействия y . Помимо изменения геометрических размеров, на обработанной поверхности также наблюдается увеличение наклёпа.

Таким образом, в случае необходимости проведения чистовой обработки режущим инструментом с покрытием рекомендуется либо учитывать деформацию обработанной поверхности и усиление наклёпа в технологическом процессе, либо «закладывать» изменение геометрических параметров РИ с покрытием на стадии проектирования инструмента.

В целях обеспечения качественного влияния ИП на процесс лезвийной обработки в практике технологического проектирования и назначения покрытия необходимо руководствоваться требованиями, предъявляемыми к материалу покрытий. Среди наиболее значимых требований выделяют: устойчивость к коррозии, высокую микротвердость, химическую пассивность к обрабатываемому материалу, термодинамическую стабильность, совместимость с ИМ.

Вместе с тем назначение ИП, обеспечивающего требуемые показатели степени физико-химического взаимодействия материала покрытия комплексно как с ОМ, так и с ИМ, является сложной задачей, требующей для своего решения как качественной, так и количественной оценки совместимости материалов [3]. Важно отметить, что в данном случае значительное влияние оказывают межмолекулярные адгезионные силы сцепления: прочность адгезионной связи системы «инструмент–покрытие» является величиной, определяющей работоспособность РИ в процессе лезвийной обработки, однако для системы «покрытие–заготовка» явление адгезии является негативным фактором, понижающим качество обработанной поверхности и точность выполняемых размеров. Таким образом, процесс рационального назначения материала покрытия требует не только понимания механизма износа РИ и условий обработки, но и знаний в области адгезионного взаимодействия твердых тел.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Явление адгезии представляет собой возникновение межмолекулярных связей на контактирующих поверхностях разнородных материалов. Количественная оценка адгезии осуществляется по работе, необходимой для разделения контактирующих слоев материалов, либо по сопротивлению приложенной деформирующей нагрузки на сдвиг или отрыв [4].

Механизм образования адгезионных связей ввиду своей сложности на сегодняшний день не поддается однозначному описанию в науке, что послужило причиной появления нескольких теорий, трактующих суть явления с различных точек зрения. Среди них выделяют: адсорбционную, механическую, электрическую, электронную, диффузионную и химическую теории.

Наиболее молодой, основывающейся на современных достижениях физики, является адсорбционная теория. Согласно ей, адгезионное взаимодействие рассматривается как поверхностный процесс, образование связей в котором объясняется действием межмолекулярных Ван-дер-Ваальсовых сил, возникающих вследствие временного сдвига электронной плотности на граничной поверхности (поверхности контакта «инструмент–деталь»). Процесс возникновения сдвига электронной плотности протекает вследствие термоэлектрических явлений (эффект Зеебека), а также возникновения электрического поля при контакте материалов с разными работами выхода электронов [4].

ВЛИЯНИЕ АДГЕЗИИ НА ПРОЦЕСС ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

Для описания адгезионных взаимодействий в общем виде допустимо использование модели высокотемпературного фрикционного контакта обрабатываемого и инструментального материала со следующими внешними параметрами: температура (≤ 1100 °C), давление (≤ 2500 МПа) [5]. Величины указанных параметров соответствуют температуре резания и давлению, оказываемому заготовкой на режущий инструмент в процессе лезвийной обработки. Адгезионные связи, возникающие при соблюдении данных условий, оказывают негативное влияние на качество обработанной поверхности, точность выполняемых размеров, существенно увеличивают износ режущего инструмента, снижают производительность и экономичность труда. Сущностью указанной проблемы является образование на площадках контакта разнородных ИМ и ОМ «мостиков схватывания» (рис. 3).

Фактически «мостики схватывания» являются очагами возникновения адгезионных связей, дальнейшее разрушение которых обусловливается перемещением стружки и

поверхностей заготовки по передней и задней поверхностям режущего инструмента соответственно.

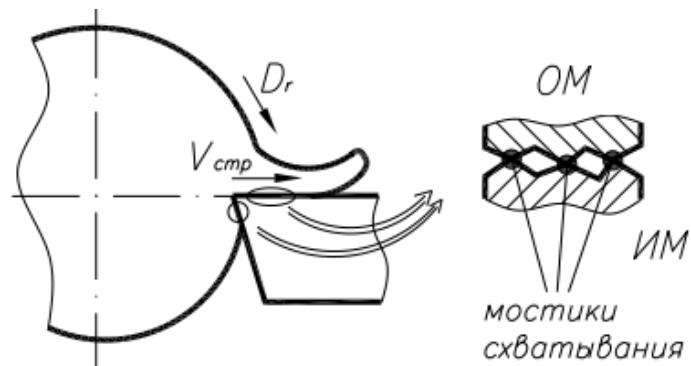


Рис. 3 Схема адгезионного износа в процессе лезвийной обработки

Таким образом, цикл возникновения и разрушения адгезионных связей в пятнах контакта приводит к появлению циклических нагрузок поверхностного объема режущего инструмента и вызывает местное усталостное разрушение, протекающее в виде выкрашивания отдельных частиц ИМ. Отколотые частицы под действием высокой температуры и давления в зоне резания подвергаются закалке, упрочнению и попадают на переднюю и заднюю поверхности инструмента, а также обработанную поверхность, что приводит к ускоренному износу инструмента и снижению качества обработки детали. Согласно исследованиям [6], степень влияния адгезионных связей на износ инструмента и качество обработанной поверхности снижается с увеличением скорости резания. Например, при точении сплава ХН73МБТЮ ($s = 0.1 \text{ мм/об}$, $t = 0.5 \text{ мм}$) металлокерамическим твердым сплавом ВК6ОМ ГОСТ 3882-74 со скоростью резания $v_1 = 30 \text{ м/мин}$ практически вся поверхность фаски износа была покрыта слоем ОМ, служащим потенциальным очагом схватывания и дальнейшего отрыва частиц ОМ. С увеличением скорости резания ($v_2 = 40 \text{ м/мин}$) и, следовательно, температуры резания наплыv ОМ на ИМ носит дискретный характер, в то время как при $v_3 = 50 \text{ м/мин}$ зоны налипания практически отсутствуют. Влияние увеличиваемой скорости резания на интенсивность протекания контактных адгезионных взаимодействий объясняется снижением хрупкости и твердости, увеличением пластичности и вязкости ИМ с увеличением температуры, что обеспечивает повышение сопротивляемости инструмента к вибрациям. Важно отметить, что дальнейшее увеличение скорости и температуры резания приводит к активизации диффузионных процессов [6].

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В практике технологического проектирования актуальна задача оперативного применения комплекса оптимальных решений, относящихся к процессу обработки, в числе которых правильный подбор ИМ и покрытия для системы ИПД (инструмент–покрытие–деталь). Проведение натурных испытаний данной системы непосредственно на металлообрабатывающих станках сопряжено трудоемкостью и значительными финансовыми затратами, вследствие чего на практике нашли широкое применение лабораторные испытания, в значительной степени приближенные к процессу резания [5].

Известен метод, позволяющий производить оценку тангенциальной прочности адгезионных связей под действием нормальных напряжений (рис. 4), в котором моделируется локальный контакт жесткой сферы радиусом R (индентор из ИМ) с полубесконечной поверхностью пластичного материала (образец из ОМ) [5]. Предварительно вдавленная в пластичный материал сфера вращается под нагрузкой вокруг собственной оси, что исключает деформационную составляющую коэффициента трения и приближает напряженное состояние зоны контакта к сложнонапряженному состоянию точек фактического контакта при трении твердых тел в реальных условиях. Соблюдение данных

условий позволяет производить количественную оценку тангенциальной прочности адгезионных связей τ_n и адгезионной составляющей коэффициента трения. Ниже приводится методика проведения оценки.

Тангенциальная прочность τ_n адгезионной связи при наличии нормальных напряжений ρ_r вычисляется по формуле (1):

$$\tau_n = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{\text{эксп}} \cdot R_{\text{опр}}}{\pi \cdot r_0^3}, \quad (1)$$

где $R_{\text{опр}}$ – радиус оправки, в которой закреплен индентор, мм;

r_0 – радиус отпечатка (лунки) на образцах, мм;

$F_{\text{эксп}}$ – предварительно измеренная экспериментальная сила, Н.

Адгезионную составляющую коэффициента трения определяют как отношение тангенциальной прочности адгезионной связи к нормальному удельному давлению. При этом предполагается, что нормальные напряжения, действующие на поверхности сферы, постоянны и равны в пределах радиуса отпечатка.

$$f_a = \frac{\tau_n}{\rho_r}, \quad (2)$$

или

$$f_a = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{\text{эксп}} \cdot R_{\text{опр}}}{N \cdot r_0}, \quad (3)$$

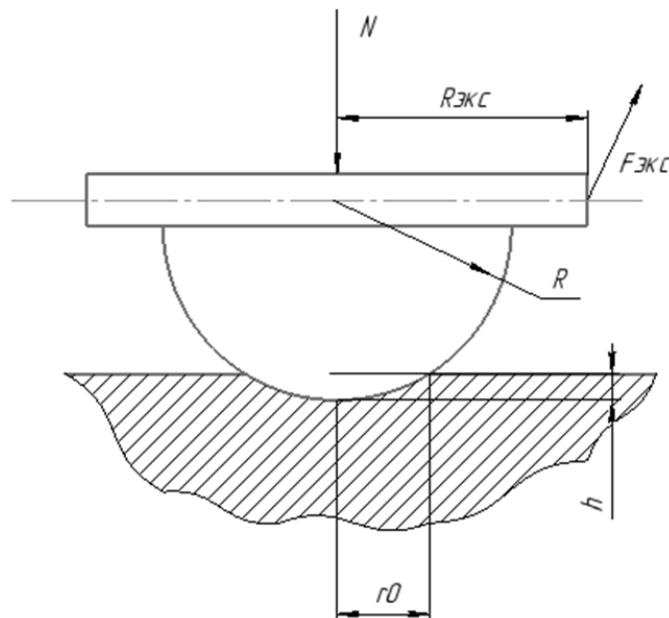


Рис. 4 Схема оценки прочности адгезионных связей на срез

Для обеспечения плотного пластического контакта образцов ОМ и ИМ и образования в нем квазижидкого слоя, приводящего к активации адгезионного схватывания ювенильных поверхностей, необходимо соблюдать условие (4):

$$0.02 \leq h/R \leq 0.2 \quad (4)$$

Сила $F_{\text{эксп}}$, необходимая для вращения сферического индентора, обуславливается в основном срезанием межмолекулярных и межатомных связей на границе раздела «деформируемый материал – шаровой индентор» (рис. 5).

Зоны, обозначенные на графике:

I – зона предварительного смещения;

II – зона начала относительного скольжения индентора;

III – зона установившегося трения.

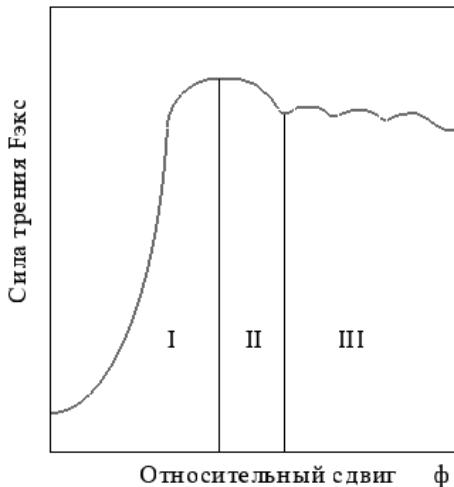


Рис. 5 Характерная запись зависимости силы трения от угла относительно сдвига (поворота) индентора

Нормальное удельное давление определяется по формуле (5):

$$\rho_r = \frac{N}{\pi r_0^2}, \quad (3)$$

где N – нормальная нагрузка на контакте.

Важно отметить, что вышеуказанная методика позволяет оценить влияние адгезионных связей в процессе трения, то есть взаимного движения между ОМ и ИМ. Однако в случае предварительного нанесения покрытия на образец инструментального материала результаты экспериментов позволяют выполнить количественную оценку адгезионного взаимодействия ИП с ОМ. В свою очередь, оценку прочности адгезионных связей в системе «инструмент–покрытие» необходимо производить в иных условиях, что обусловлено отсутствием взаимного движения контактирующих слоев инструментального материала и покрытия, за исключением упругих и микропластических деформаций. Прочность адгезионных связей вышеупомянутой системы определяется работой $A_{\text{отр}}$ или силой $F_{\text{отр}}$ отрыва, что фактически характеризует сопротивление расслоению контактирующих материалов ИМ и ИП, то есть прочность сцепления покрытия с подложкой [1].

Для проведения дальнейших исследований адгезионных взаимодействий системы ИПД по вышеприведенной методике была сконструирована установка для ускоренного определения оптимальной марки инструментального материала (рис. 6).

Установка предназначена для ускоренного определения оптимальной марки инструментального материала для конкретного обрабатываемого материала по характеру изменения прочности межмолекулярных связей на срез или отрыв при различных температурах и нормальных нагрузках локального фрикционного контакта [4].

Помимо определения оптимальной марки ИМ, установка позволяет выполнять следующие операции:

- оперативная оценка режущей способности инструмента;
- исследование адгезионных и диффузионных явлений в целом;
- получение тарировочных зависимостей для термоЭДС (ε_t) от температуры;
- оперативная оценка прочности адгезионных связей в износостойких покрытиях (с ОМ, ИМ; между различными слоями).

В качестве выходных параметров, то есть результатов эксперимента, выступают: тангенциальная прочность τ_n адгезионной связи, адгезионная составляющая коэффициента трения f_a , силой отрыва $F_{\text{отр}}$, тарировочная зависимость $\varepsilon_t(\theta t)$ для испытуемой пары ОМ и ИМ. Оценка режущей способности инструмента проводится аналогично ускоренной

методике подбора оптимального ИМ (см. формулы 1–3), что объясняется непосредственным влиянием прочности адгезионных связей между ИМ и ОМ на стойкость РИ.

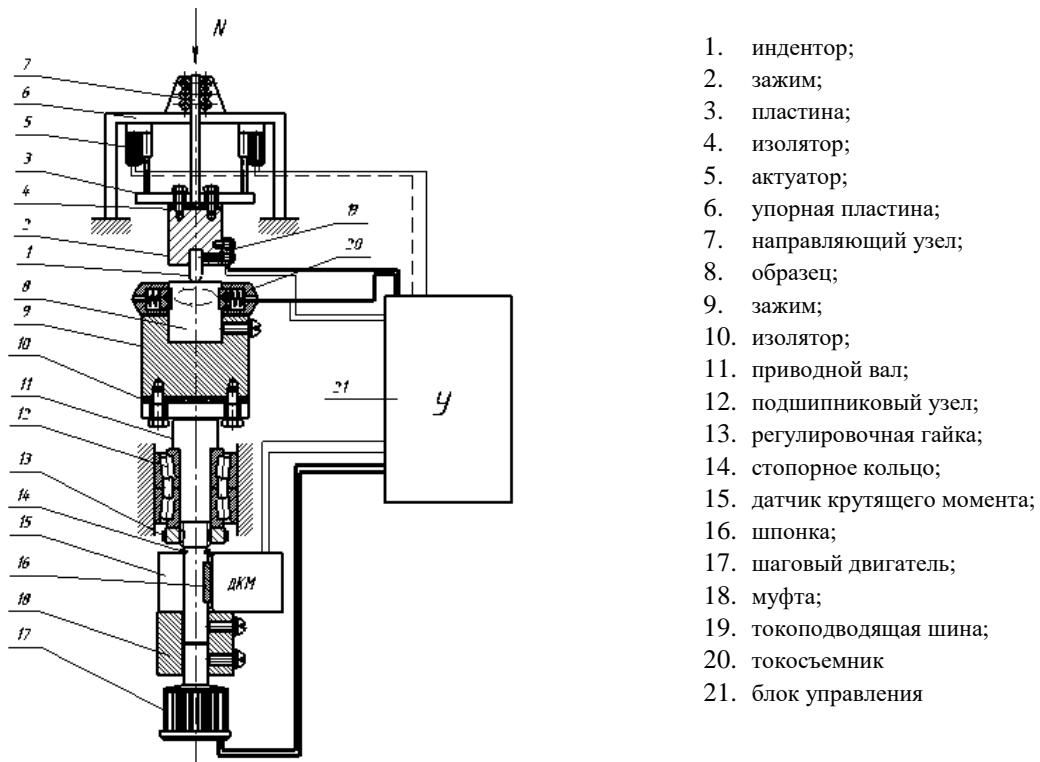


Рис. 6 Принципиальная схема установки для ускоренного определения оптимальной марки инструментального материала

Таким образом, функционал установки обеспечивает возможность полноценного исследования адгезионного взаимодействия для систем ИПД, позволяет качественно и количественно оценивать совместимость материала покрытия с ОМ и ИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа физико-механических характеристик современных износостойких инструментальных покрытий, а также предъявляемых к ним требований были определены основные направления их дальнейшего исследования в контексте адгезионного взаимодействия.

Рассмотрены особенности, возникающие при эксплуатации покрытий, влияющие на процесс технологического проектирования операций лезвийной обработки и проектирования режущего инструмента.

Разработана установка, позволяющая оперативно проводить исследования адгезионных взаимодействий в инструментальных материалах, покрытиях и системе «инструмент–приспособление–деталь» в целом.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Григорьев С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: Учебник / С. Н. Григорьев. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2023. 368 с. ISBN 978-5-907523-33-3. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/307286> (дата обращения: 20.08.2025). Режим доступа: для авториз. пользователей.
- Григорьев С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / Григорьев С. Н., Табаков В. П., Волосова М. А. Старый Оскол: ТНТ, 2020.

3. Табаков В. П. Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента: Уч. пос. / В. П. Табаков, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев, А. А. Верещака. 2-е изд., перераб. и доп. Ульяновск: УлГТУ, 2023. 227 с. ISBN 978-5-9795-2306-4. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/416291> (дата обращения: 20.08.2025). Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Сапожников Г. Ю. Адгезионные процессы при лезвийной обработке и их влияние на инструментальные покрытия // Актуальные проблемы науки и техники: Мат-лы II Всероссийской весенней школы-семинара молодых ученых / Г.Ю. Сапожников, С.Х. Хадиуллин, П.П. Черников. Уфа, 2025.
5. Постнов В. В. Процессы на контактных поверхностях, износ режущего инструмента и свойства обработанной поверхности: Уч. пос. / В. В. Постнов, Б. У. Шарипов, Л. Ш. Шустер. Свердловск: Изд-во Уральского университета, 1988. 224 с.
6. Хадиуллин С. Х. Микроструктурные исследования изнашиваемых поверхностей твердосплавного инструмента // СТИН. 2008. №3. С. 12–15.

ОБ АВТОРАХ:

САПОЖНИКОВ Георгий Юрьевич, студ. каф. АТП, оператор ЭВИВМ 4 р-д.

САЗАНОВ Андрей Александрович, инженер каф. АТП.

ХАДИУЛЛИН Салават Хакимович, к.т.н. доц. каф. АТП.

METADATA:

Title: Tool coatings for blade processing and criteria for their appointment.

Author: G. Y. Sapozhnikov¹, S. K. Khadiullin², A. A. Sazanov³

Affiliation:

¹⁻³ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia,

Email: ¹sapozhnikov.rep@mail.ru,

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (34), pp. 85-93, 2025.
ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The article discusses the physical foundations of adhesive interactions in the process of blade processing, their effect on the surface to be treated and wear-resistant tool coatings, as well as general coating requirements and methods for assessing the effect of adhesive bonds.

Key words: Blade processing, adhesion, high-temperature friction contact, installation, accelerated method, tool material, wear-resistant coatings, surface quality, contact interactions.

SAPOZHNIKOV Georgy Yurievich, student, Dept. of AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES (UUST).

SAZANOV Andrey Alexandrovich, engineer, Dept. of AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES (UUST).

KHADIULLIN Salavat Khakimovich, docent, Dept. of AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES (UUST).