

ПЕРЕХОД К СУХОМУ РЕЗАНИЮ В МАШИНОСТРОЕНИИ: ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ

Икромидинов Б.А
Акбаров Х.У
Файзиматов Б.Н

*Кафедра технология машиностроения Андижанский государственный
технологический институт*

Аннотация: *В современной машиностроительной отрасли наблюдается тенденция отказа от традиционных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) при обработке резанием в пользу технологий сухого резания. Данный обзор систематизирует прогресс в области инструментальных материалов и покрытий, позволяющих эффективно резать без использования СОЖ, а также рассматривает специальные конструктивные решения инструмента (например, минимально-воздушную смазку). Проанализированы влияния сухого резания на производительность, износ инструмента, точность обработки, простои оборудования и затраты. Отдельное внимание уделено экологическим преимуществам (сокращение отходов, устранение загрязнений) и экономическим выгодам (снижение расходов на СОЖ и их утилизацию, упрощение очистки деталей), а также улучшению условий труда за счёт отсутствия аэрозолей и брызг. В заключение обсуждаются перспективы развития технологии сухой обработки в контексте новых покрытий, самосмазывающихся материалов, текстурированных инструментов и других инноваций, обеспечивающих устойчивое развитие машиностроительного производства.*

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно при механической обработке металлов применяются смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) для снижения трения и температуры в зоне резания.

Однако использование СОЖ сопряжено с существенными затратами и экологическими проблемами. По оценкам, порядка 17–20% себестоимости механической обработки приходится на закупку и обслуживание СОЖ. Более того, расходы на утилизацию отработанных охлаждающих жидкостей зачастую превышают их исходную стоимость.

Помимо экономических издержек, существуют серьёзные проблемы охраны труда и экологии: до 80% профессиональных кожных заболеваний у рабочих связаны с контактом с туманом и испарениями от охлаждающих масел, а концентрация масляного аэрозоля в цехах автомобильной промышленности достигает 20–90 мг/м³ при норме не более 0,5 мг/м³.

Строгие экологические нормативы и требования безопасности труда всё более ограничивают применение СОЖ, повышая интерес промышленности к сухому резанию – обработке без подачи охлаждающих жидкостей.

Переход к сухому резанию обещает значительные экономические и экологические выгоды. Полный отказ от СОЖ позволяет устранить связанные с ними расходы, а также избегать загрязнения воды и воздуха, вызванного эмульсиями и масляными парами.

Однако удаление охлаждающей и смазывающей среды обостряет проблемы тепловыделения и трения в зоне резания. В последние годы достигнут прогресс в области режущих инструментов, который делает возможным эффективное сухое точение, фрезерование и сверление без ущерба качеству.

Современные твердые сплавы, керамические материалы и защитные покрытия позволяют инструменту выдерживать повышенные температуры и нагрузки при отсутствии смазки. Также внедряются специальные методики минимальной смазки (MQL) и конструктивные улучшения, снижающие трение и износ.

Настоящий обзор фокусируется на новейших достижениях в технологии сухого резания, прежде всего применительно к машиностроению. Рассматриваются: (1) инструментальные материалы и износостойкие покрытия с низким коэффициентом трения, разработанные для работы без СОЖ; (2) инструменты с внутренней подачей минимальной смазки и другие конструктивные инновации; (3) влияние отказа от СОЖ на эффективность производства, стойкость и точность обработки; (4) экологические преимущества сухого резания; (5) экономическая оценка эффекта от исключения охлаждающих жидкостей; (6) улучшение условий труда при отсутствии масляных туманов; (7) перспективные тенденции развития технологии сухой обработки. Обзор подкреплён ссылками на актуальные научные исследования и содержит сравнение ключевых показателей традиционного и “сухого” процессов.

Новые инструментальные материалы и покрытия для сухого резания

Успешная работа без охлаждающей жидкости во многом стала возможна благодаря развитию современных режущих материалов и покрытий, способных работать при повышенных температурах и трении. Базой металлорежущего инструмента по-прежнему служат твердые сплавы (цементированные карбиды WC-Co), однако их состав и структура оптимизируются под сухое резание. Применяются субмикрозернистые карбиды с повышенной жаропрочностью и градиентные по составу твердые сплавы – например, с обогащенной кобальтом зоной у режущей кромки для повышения её вязкости. Такие сплавы сочетают твёрдость сердцевины и ударную вязкость поверхности, снижая риск разрушения инструмента при переменных тепловых нагрузках.

Особую роль играют износостойкие покрытия с низким коэффициентом трения, наносимые на режущий инструмент. Многослойные покрытия на основе нитридов и оксидов значительно повышают жаростойкость инструмента и защищают его от износа в условиях отсутствия смазки. Например, промышленные фрезерные пластины для сухого резания часто имеют сложное покрытие: базовый слой TiCN для адгезии и предотвращения растрескивания, затем микрокристаллический оксид алюминия Al_2O_3 как тепловой барьер, далее слой нитрида титана-карбона для защиты от абразивного износа и верхний слой нитрида титана (TiN) для снижения налипания и удобства контроля износа. Подобные многослойные системы толщиной до ~20 мкм формируются комбинацией методов CVD/PVD и обеспечивают инструменту превосходную стойкость при сухом высокоскоростном резании.

Прогресс в физическом вакуумном осаждении (PVD) позволил создать поколения твердых покрытий типа TiN, TiAlN, AlTiN, TiCN, AlCrN и др., которые стали стандартом для сухой обработки сталей и чугуна. Нитрид алюминия-титана (AlTiN) признан одним из лучших покрытий для сухого резания благодаря высокой твердости и способности образовывать тугоплавкую оксидную плёнку Al_2O_3 , экранирующую тепло. Исследования показывают, что применение AlTiN-покрытых пластин вместо непокрытых повышает стойкость инструмента и уменьшает силы резания даже при обработке труднообрабатываемых сплавов (например, Inconel 718) в сухих условиях. В целом, нанесение твёрдых покрытий позволяет увеличить допустимую скорость резания на 30–100% и продлить срок службы инструмента до 2–3 раз по сравнению с непокрытым инструментом.

Помимо нитридных, разрабатываются самосмазывающиеся покрытия, содержащие твёрдые смазочные фазы (дисульфид молибдена MoS_2 , графит, WS_2 и др.). Такие покрытия способны значительно снизить коэффициент трения на границе раздела без участия жидкой смазки. Например, молибденовый дисульфид в составе покрытий улучшает трибологические свойства режущего инструмента и привлекает повышенный интерес именно для сухого резания. Алмазоподобное углеродное покрытие (DLC) также обладает уникально низким сухим трением ($\mu \sim 0,05-0,1$) при высокой твердости (более 1500 HV), что способствует уменьшению износа и налипания стружки на режущую кромку при обработке без СОЖ. Однако обеспечение прочной адгезии подобных низкотемпературных слоев – отдельная научно-техническая задача; ограниченная прочность пленок DLC при высоких нагрузках пока сдерживает их широкое применение на тяжело нагруженных инструментах.

Для сухого точения закалённых сталей и жаропрочных сплавов успешно применяются инструменты из керамики и сверхтвёрдых материалов. Керамические режущие пластины на основе оксида алюминия (Al_2O_3) или нитрида кремния (Si_3N_4) обладают превосходной термостойкостью – они

сохраняют твёрдость при 1000 °С и выше, тогда как традиционный твёрдый сплав резко размягчается. Особенно эффективны смешанные керамики с добавками карбида титана (Al_2O_3+TiC) или с упрочнением волокнами карбида кремния (whisker-reinforced ceramics). Добавление SiC-"усиков" увеличивает ударную вязкость и сопротивление тепловому удару керамического инструмента, позволяя ему выдерживать резкие перепады температуры без растрескивания. Так, алюмооксидная керамика, армированная SiC, рекомендуется для сухого высокоскоростного точения жаропрочных сплавов и закалённых материалов при температурах резания >1000 °С. Силикатно-нитридные керамики (SiAlON) нашли применение в сухом точении жаропрочных никелевых сплавов: они характеризуются сочетанием высокой износостойкости и достаточной стойкости к надколам, обеспечивая стабильный износ без смазки на больших скоростях.

Сверхтвёрдые материалы также внесли вклад в безсмазочную обработку. Кубический нитрид бора (cBN) и поликристаллический алмаз (PCD) незаменимы при чистовом точении особо твёрдых или абразивных материалов без охлаждения. Инструменты с пластинами из cBN успешно применяются для сухого точения закалённых сталей (HRC>60) вместо шлифования, обеспечивая высокое качество поверхности. Поликристаллический алмаз эффективен при сухой высокоскоростной обработке алюминиевых и кремниево-алюминиевых сплавов, композитов, где исключение жидкой смазки устраняет риск реакций с материалом инструмента. Например, при фрезеровании алюминия сплавы с PCD-напайками демонстрируют минимальный износ и отсутствие налипания, превосходя даже твёрдые покрытия, которые могут скалываться из-за прилипания алюминия.

Таким образом, сочетание прогрессивных твердых сплавов, керамик и многослойных износостойких покрытий сформировало основу для эффективного сухого резания. Инструментальные материалы, обладающие высокой жаропрочностью и малым трением, компенсируют отсутствие СОЖ, сохраняя стойкость режущей кромки и качество обработки.

Инструменты с минимальной смазкой и инновационные конструктивные решения

Помимо материалов и покрытий, важную роль в отказе от обильной подачи СОЖ играют конструктивные и технологические решения, призванные минимизировать трение и охлаждать зону резания альтернативными способами. Одно из таких направлений – минимально-количественная смазка (MQL, Minimum Quantity Lubrication), часто называемая полусухой обработкой. При MQL кромка инструмента смазывается микроскопическим количеством масла, подаваемого в виде аэрозоля сжатым воздухом. Расход жидкости снижается на несколько порядков: вместо 5–10 литров в минуту,

характерных для классического охлаждения, подача составляет лишь десятки миллилитров в час. Например, системы MQL способны ограничить подачу масла ~50 мл/час, тогда как при заливе СОЖ расход может достигать 600 л/час. Аэрозоль практически полностью испаряется или уносится стружкой в процессе, оставляя деталь и станок почти сухими. Благодаря этому, детали после обработки не требуют трудоёмкой промывки, а получаемая стружка чистая и сразу готова к переработке. MQL-технология сокращает затраты на покупку эмульсий и их утилизацию, а также устраняет образование густого эмульсионного шлама из стружки.

Для реализации минимальной смазки были разработаны специальные конструкции инструмента и станочной оснастки. Так, современные металлорежущие центры часто оснащаются внутренними каналами в шпинделе и державках, которые подводят аэрозоль MQL непосредственно к режущей кромке. Внутренняя подача смазки через инструмент значительно эффективнее внешнего распыления, особенно при сверлении глубоких отверстий и высокой частоте вращения. Инженеры компании Ingersoll, например, предложили интегрировать в каналы крупногабаритных фрез специальные трубки, компенсирующие центробежное расслаивание аэрозоля на высоких оборотах. Это позволило равномерно доводить масляный туман до каждого режущего зуба. Кроме того, размещение камеры смешения воздуха с маслом максимально близко к инструменту (в шпинделе) улучшает стабильность состава аэрозоля. Такие конструктивные решения, внедряемые в серийный инструмент крупных производителей (Sandvik, Seco, Ingersoll и др.) делают микросмазку надёжной и управляемой. В результате, минимально-смазочное резание сочетает плюсы сухой обработки (отсутствие обильных отходов) с эффектом тонкой смазочной плёнки, понижая трение и температуру на контакте.

Другой инновационный подход – создание самосмазывающихся инструментов, где твёрдые смазочные материалы включены непосредственно в структуру режущего материала. Исследования показывают обнадеживающие результаты: добавление всего ~1 мас.% графита в состав твёрдого сплава WC-Co (например, методами искрового плазменного спекания) способно снизить износ при сухом трении почти на порядок за счёт формирования на поверхности смазочной плёнки из графита. В одном эксперименте образцы карбида с 1% графита показали скорость износа до 9 раз меньшую, чем у обычного сплава без добавок. В процессе трения на поверхности образуется тонкий трибофيلم из графита и оксидов, предотвращающий прямой контакт и прилипания частиц обрабатываемой стали к инструменту. Подобные самосмазывающиеся твердые сплавы и керамики (например, с включениями CaF₂ или MoS₂) позволяют реализовать “сухую смазку” непосредственно за счёт материала инструмента.

Хотя такие материалы ещё находятся в стадии исследований, они указывают путь к инструменту, не требующему внешней подачи смазки вообще.

Чтобы снизить трение без смазки, перспективным направлением стало микротекстурирование поверхности инструмента. Нанесение микрорельефа (канавок, ямок) на переднюю или заднюю поверхность режущей пластины меняет её трибологические свойства. Микротекстуры действуют как микро-резервуары для твёрдых смазочных частиц и уменьшают реальную площадь контакта стружки с инструментом. Экспериментально показано, что продольные канавки и точечные впадины на режущей поверхности способны снизить силы резания на 10–20% и усилия подачи на 20–30% в условиях сухого точения. Это приводит к меньшему трению и нагреву, повышая стойкость инструмента. Например, при точении жаропрочного сплава Inconel 600 текстурированные пластины с последующим покрытием TiAlN изнашиваются значительно медленнее гладких. Текстурирование особенно эффективно в сочетании с твёрдыми смазочными покрытиями: микроканавки улучшают удержание смазочного слоя, а покрытие обеспечивает его стабильность – такая синергия сейчас активно исследуется.

Наконец, к конструктивным решениям для сухого резания можно отнести специальные геометрии режущего инструмента, уменьшающие выделение тепла. Пример – пластины с ограниченной длиной контакта (концепция VRCT, Variable Restricted Contact Tools), где форма режущей кромки и фаски снижает трение и температуру резания. Другой подход – встроенные в инструмент элементы охлаждения: теплопроводящие вставки или миниатюрные теплоотводы, которые рассеивают тепло от зоны резания. Также в практику внедряются альтернативные методы охлаждения без жидкостей – подача сжатого охлаждённого воздуха, использование вихревых трубок для получения холодного потока, криогенное охлаждение испаряющимися газами (жидким азотом, CO₂) и др. Хотя крио-способы не являются “сухим резанием” в строгом смысле (это скорее чистое охлаждение, не оставляющее отходов), они часто рассматриваются вместе с MQL как часть стратегии экологичного минимально-замкнутого охлаждения.

В целом, современные технологические решения – от минимальной аэрозольной смазки до особой геометрии инструмента и самосмазывающихся материалов – дополняют прогресс покрытий и сплавов. Их комбинация позволяет успешно применять сухое резание во всё более широком диапазоне операций, сохраняя или даже улучшая производительность.

Производственная эффективность и качество при сухом резании

Отказ от СОЖ существенно влияет на параметры процесса резания – температуры, силы, износ – что, в свою очередь, сказывается на производительности и качестве обработки. Важно оценить, как сухое резание соотносится с традиционным мокрым (с охлаждением) по ключевым

технологическим показателям: стойкости инструмента, допустимым режимам резания, точности и шероховатости получаемых поверхностей, а также продолжительности производственных циклов.

Стойкость и износ инструмента. В отсутствие охлаждения режущий инструмент испытывает более высокие температуры и трение, что обычно уменьшает его срок службы относительно обработки с подачей смазки. Например, при сухом точении нержавеющей стали без специальных мер наблюдается более интенсивный износ и худшая шероховатость, чем при мокром точении. Однако современные покрытия и материалы в значительной мере компенсируют этот эффект. Парадоксально, в некоторых случаях сухое резание может увеличить ресурс инструмента, устраняя термический шок от периодического охлаждения. При прерывистом резании (фрезерование, точение дискретных поверхностей) чередование нагрева и резкого охлаждения инструментальной кромки приводит к образованию сетки термических трещин и сколам твердого сплава. Отсутствие СОЖ сглаживает температурные колебания: хотя средняя температура выше, амплитуда её изменений меньше. Как отмечает промышленный опыт, при сухом высокоскоростном фрезеровании закалённых сталей резец работает в более стабильном тепловом режиме, что снижает термоусталостное растрескивание и продлевает жизнь хрупких твердых материалов (керамики, CBN). Кроме того, отсутствие водосодержащих эмульсий устраняет риск вымывания кобальтовой связки из карбида и её выкрашивания при резком охлаждении. В результате современные твердосплавные пластины с толстым жаропрочным покрытием могут в сухом резании показывать сопоставимый или лишь незначительно меньший ресурс по сравнению с охлаждаемыми – предприятия готовы пожертвовать несколькими процентами стойкости инструмента, чтобы полностью избежать издержек на СОЖ.

Скорость и производительность. При правильно подобранном инструменте сухое резание позволяет сохранять, а иногда и повышать режимы резания, тем самым, не снижая производственной эффективности. Ключевым является управление тепловым балансом: часть тепла должна уноситься стружкой. Для этого зачастую используют повышенные скорости резания – при большом быстрорежущем скоростном резании доля тепла, уходящего со стружкой, возрастает, а инструмент хотя и нагревается сильнее, но основной нагрев сосредоточен в зоне контакта стружки, быстро покидающей место резания. Так, при точении сталей покрытия типа AlTiN позволяют повысить скорость резания на 20–30% без ухудшения стойкости, благодаря тому что покрытие удерживает высокую температуру на поверхности контакта и способствует пластическому течению стружки. В ряде случаев сухое резание стимулировало переход к высокоскоростной обработке: например, точение серого чугуна керамическими пластинами эффективно выполняется всухую на скоростях в

разы выше обычных, что значительно сокращает время цикла. Таким образом, грамотный выбор инструмента позволяет избежать снижения производительности при отказе от охлаждения. Если же требуемое качество поверхности и допуски требуют ограничения температуры (например, во избежание теплового расширения заготовки), то применяется минимальная смазка или промежуточные методы охлаждения, о которых говорилось выше, чтобы сохранить скорость обработки.

Качество поверхности и точность. Удаление СОЖ может влиять на формирование поверхности детали. С одной стороны, отсутствие смазки повышает трение между стружкой и передней поверхностью резца, что может привести к росту шероховатости из-за налипания материала на режущей кромке (образования нароста) при обработке вязких материалов. Например, при сухом точении вязких сталей риск образования build-up edge выше, что может ухудшить чистоту поверхности, тогда как в присутствии смазки это явление подавляется. С другой стороны, применение специальных покрытий (TiN, TiAlN) и высоких скоростей минимизирует налипание – тонкие химически инертные покрытия препятствуют адгезии материала, а высокая температура в зоне резания препятствует его «прилипающему» течению. По данным экспериментов, при сухой чистовой обработке алюминиевых сплавов инструментом с покрытием TiN достигается даже меньшая шероховатость, чем без покрытия с СОЖ, благодаря отсутствию нароста на острие. Что касается точности, здесь фактором является тепловое расширение детали от нагрева. В мокром резании заготовка охлаждается, а при сухом – прогревается сильнее, что теоретически может вызывать отклонения размеров. Однако на практике при стабильном режиме размеры меняются предсказуемо, и при наладке процесса можно компенсировать тепловой рост. Более того, избегая локального неравномерного охлаждения, сухое резание обеспечивает стабильную геометрию: разница температур инструмента между резанием и холостым ходом меньше, а потому минимизируется термодформация станка и инструмента во время цикла. В целом, современные станки с ЧПУ способны автоматически учитывать температурные факторы, и при правильно выбранных параметрах качество и точность при сухой обработке соответствуют требованиям машиностроения.

Простой и эксплуатационной эффективности. Отсутствие СОЖ упрощает и ускоряет ряд производственных операций, что косвенно повышает эффективность. Во-первых, исключается этап мойки деталей после мехобработки – при традиционном резании детали обычно покрыты маслянистой эмульсией и требуют очистки перед сборкой или окраской, тогда как сухо обработанные детали выходят чистыми. Это сокращает общее время производственного цикла и энергозатраты на моечное оборудование. Во-вторых, облегчается обращение со стружкой: сухая стружка сразу идёт в бункер

или на переработку, не требуя слива и фильтрации жидкости. На крупных заводах переработка стружки может быть интегрирована прямо в линию, поскольку стружка не загрязнена маслом. В-третьих, техническое обслуживание станков упрощается: отпадает необходимость регулярно менять эмульсию, чистить систему охлаждения от бактерий и шлама, следить за концентрацией присадок и pH. Операции, связанные с обслуживанием СОЖ (замена фильтров, долив, проверка), нередко требуют остановки оборудования – при сухом же резании этих простоев нет. По оценкам, содержание большого охлаждающего хозяйства (емкости, насосы, фильтры) в крупносерийном производстве отнимает сотни человеко-часов и значительные деньги. Исключение этого блока прямо увеличивает коэффициент технической готовности оборудования. Наконец, отсутствует риск внеплановых простоев из-за проблем с СОЖ – например, поломки насоса охлаждения, протечки или необходимой внеочередной очистки баков.

Суммируя, при переходе к сухому резанию грамотная адаптация технологии (новый инструмент, оптимизация режимов) позволяет достичь сопоставимой производительности без ухудшения качества. Небольшое возможное снижение стойкости инструмента перекрывается сокращением непроизводительных операций. Производственный процесс становится более прямым и быстрым: от станка – сразу к следующей операции или в сборку, без задержек на очистку. Далее, для наглядности, сравним ключевые технологические и экологические параметры традиционной и сухой обработки.

Сравнительная характеристика сухого резания и резания с СОЖ

Для целостной оценки различий между традиционным резанием с охлаждением и сухим резанием в машиностроении ниже приведена обобщающая таблица. В ней сопоставлены основные технологические показатели процесса, а также экологические и экономические аспекты двух подходов.

Параметр	Сухое резание (без СОЖ)	Резание с применением СОЖ
Теплоотвод от зоны резания	За счёт стружки и излучения. Повышенная температура в зоне, но без резких перепадов. Требуются жаропрочные инструменты.	За счёт охлаждающей жидкости. Температура ниже, но постоянные перепады (тепловой шок) при подаче/отводе СОЖ.
Износ инструмента	Возможен ускоренный износ без смазки. Современные покрытия (напр. AlTiN) снижают трение и обеспечивают сопоставимую стойкость. Отсутствие термоудара иногда повышает стойкость хрупких пластин.	Обычно более низкие температуры и трение уменьшают износ. Инструмент служит дольше, но резкие охлаждения могут вызывать термотрещины (особенно в керамике, CBN).
Режимы резания (скорость, подача)	Требуется оптимизация. Часто применяются высокие скорости, чтобы больше тепла уносилось	Позволяет стандартные или повышенные режимы за счёт активного охлаждения. Однако

	стружкой. Допустимо увеличение скорости на 20–30% с жаропрочным инструментом. Ограничения по подаче компенсируются острыми геометриями и покрытием (для снижения сил).	очень высокие скорости могут приводить к интенсивному испарению и кавитации в СОЖ. Обычно безопаснее для инструмента работать в консервативном диапазоне скоростей.
Шероховатость и точность	При правильном инструменте – высокое качество достижимо. Возможны проблемы налипания на кромку при обработке вязких материалов без смазки; решаются покрытием или MQL. Нагрев детали больше, но равномерней – размеры стабильны, тепловое расширение учитывается настройками.	Как правило обеспечивает хорошую поверхность благодаря смазке – меньше налипания, тоньше стружка. Охлаждение сохраняет точные размеры во время резания, но может вызывать локальные деформации (неравномерное охлаждение). В целом немного лучше шероховатость на трудных материалах.
Управление стружкой	Сухая стружка ломается мелко при правильных режимах (иногда облегчено ломателями стружки для быстрого остывания). Чистая стружка легко удаляется конвейером, готова к переработке без очистки. Пыль и мелкие частицы могут свободно разлетаться, требуется пылеудаление при шлифовании.	СОЖ помогает дробить и вымывать стружку из зоны резания. Стружка оседает во влажном виде, часто слипается. Требуется слива, фильтрации и сушки перед переработкой. Мелкая стружка собирается жидкостью, уменьшая запыленность, но образует осадок (шлам) в системе охлаждения.
Время на вспомогательные операции	Минимально. Нет операций по заливке/смешиванию эмульсии, регулировке подачи СОЖ. Не требуется мойка деталей после обработки – экономия времени и ресурсов. Нет остановок на обслуживание охлаждающей системы.	Существенное. Требуется периодически готовить и добавлять эмульсию, останавливать станки для чистки баков, смены фильтров. После обработки детали нуждаются в промывке/сушке от масла. Обслуживание системы СОЖ ведет к простоям оборудования.
Расходы на материалы процесса	Отсутствуют затраты на охлаждающую жидкость. Экономия ~15–20% себестоимости за счёт исключения СОЖ. Возможен небольшой рост расхода инструмента (компенсируется общей экономией).	Затраты на покупку СОЖ, присадки, энергию для насосов. В автоиндустрии до 20% от общих производственных затрат – охлаждение, против ~7% на режущий инструмент.
Утилизация и экология	Нет опасных отходов: отсутствует отработка СОЖ, не образуется маслянистый шлам. Сокращение промышленных отходов и выбросов	Необходимо обезвреживать использованную эмульсию (до сотен литров), которая классифицируется как опасный

	в воду/атмосферу практически до нуля. Снижение углеродного следа за счёт устранения производства и утилизации масел.	отход. Утилизация сложна и дорога – в 1,5–2 раза дороже самого процесса резания. Возможны утечки и загрязнение сточных вод. Возникает масляный туман в воздухе цеха, требующий вентиляции и фильтрации.
--	--	---

(Примечание: В таблице обобщены типичные тенденции; конкретные результаты зависят от материала детали, режущего инструмента и условий обработки.)

Экологические преимущества отказа от СОЖ

Одним из самых веских аргументов в пользу сухого резания является существенное снижение экологической нагрузки производства. Применение охлаждающих жидкостей в металл加工ке сопряжено с образованием большого объёма отходов и выбросов. При переходе на технологию без СОЖ эти негативные факторы практически устраняются.

Во-первых, исчезает проблема утилизации отработанных СОЖ. Эмульсионные и масляные охлаждающие жидкости, отслужившие свой срок, относятся к опасным отходам, требующим специальной переработки. Заводы вынуждены регулярно сдавать тонны отработки на обезвреживание, что связано с большими издержками и рисками утечек. Сухое резание полностью ликвидирует этот поток отходов – отсутствуют использованные эмульсии, пропитанные маслом фильтры и осадки. Сокращение отходов напрямую способствует реализации принципов ресурсосбережения и безотходного производства. Как отмечается в исследованиях по устойчивому производству, сухая обработка устраняет загрязнение воды и почвы, характерное для традиционных механообработок с жидкостями. Нет загрязнённых сточных вод, которые обычно содержат эмульгаторы, присадки, тяжелые металлы от износа – все эти компоненты не попадают в окружающую среду.

Во-вторых, снижаются выбросы в атмосферу внутри и вокруг производства. При мокром резании неизбежно образование масляного аэрозоля: мельчайшие капли СОЖ выбрасываются стружкой и разлетаются в воздухе. Без надлежащей вентиляции концентрации аэрозоля многократно превышают допустимые нормы, что отражается на здоровье рабочих и приводит к выбросам в атмосферу за пределы цеха. При сухом методе образование аэрозолей отсутствует – воздух чище, и необходимость в системе очистки воздуха минимальна. Кроме того, исключается испарение летучих органических соединений из СОЖ (например, компонент минеральных масел), тем самым уменьшается общий уровень загрязнения воздуха. В итоге предприятия, перешедшие на сухое резание, легче соответствуют строгим экологическим нормам и стандартам (ISO 14000 и др.) по выбросам.

Ещё один аспект – рациональное использование ресурсов. Производство и эксплуатация СОЖ связаны с потреблением воды, нефти (для получения масел), энергии на поддержание работы охладительных систем. Отказ от них экономит природные ресурсы и сокращает углеродный след продукции. Исследования указывают, что около 17% себестоимости продукта при традиционной обработке связано с СОЖ, а их утилизация требует энергозатрат, вдвое превышающих затраты энергии самого процесса резания. Снижение этих расходов означает более экологичное и устойчивое производство. Также важно, что сухая стружка без масел может сразу отправляться во вторичную переплавку. Это повышает процент рециклинга металлических отходов: стружку не нужно отмывать и сушить, нет потерь металла из-за загрязнения эмульсией. Таким образом, сухое резание способствует экономике замкнутого цикла – отходы обратно превращаются в ресурс.

Наконец, нельзя не упомянуть отсутствие загрязнения оборудования и рабочих зон. В традиционных цехах масляный туман оседает на станках, полу, стенах, требуя регулярной уборки с применением химических средств. Эти загрязнения со временем могут проникать в почву или канализацию при уборке. При сухой же обработке подобного вторичного загрязнения нет: производственная зона остаётся относительно чистой, что облегчает сбор металлической пыли и стружки пылесосами и магнитными ловушками. Риск случайных разливов эмульсии или утечек также равен нулю.

Подводя итог, сухое резание значительно повышает экологическую устойчивость машиностроительного производства. Оно минимизирует образование вредных отходов, предотвращает загрязнение гидросферы и атмосферы, улучшает условия для переработки металлов. Эти преимущества имеют стратегическое значение в условиях ужесточения природоохранных требований и курса промышленности на “зелёные” технологии.

Экономическая оценка и выгоды

Переход на сухое резание привлекает производителей не только экологическими, но и ощутимыми экономическими преимуществами. Исключение СОЖ из технологического процесса позволяет сэкономить значительные средства, особенно в массовом производстве, где затраты на охлаждение накапливаются лавинообразно.

Как отмечалось, затраты на СОЖ могут составлять до пятой части от всех производственных расходов в механической обработке. В эту сумму входит закупка эмульсий или масел, воды для их разведения, электроэнергия для насосов и охладителей, добавки (ингибиторы коррозии, биоциды, антипенные), а также труд персонала, обслуживающего систему. По данным автомобильной промышленности, расходы на охлаждающие жидкости (~20%) существенно превышают затраты на режущий инструмент (~7,5%). Поэтому даже некоторый рост износа инструмента при сухом резании не нивелирует общей экономии –

стоимость дополнительных пластин гораздо ниже, чем годовой бюджет на СОЖ. Более того, современные исследования отмечают случаи, когда оптимизация сухого процесса вовсе не приводит к росту расходов на инструмент (стойкость остается приемлемой), а суммарные удельные затраты на обработку детали снижаются двузначно. Так, компания Ford сообщала, что переход к минимальной смазке (MQL) вместо обильного охлаждения дал сокращение общих затрат на ~15%, учитывая даже возможное увеличение расхода инструмента. Это подтверждает, что экономия на жидкостях и обслуживании превосходит дополнительные издержки.

Важная статья экономии – издержки на утилизацию. Отработка СОЖ требует либо очистки для повторного использования, либо вывоза на специализированные предприятия. И то, и другое обходится дорого. Источники указывают, что расходы на утилизацию использованной охлаждающей жидкости достигают величин, сравнимых и даже больших, чем стоимость самой обработки. Фактически предприятие платит дважды: сначала за приобретение и эксплуатацию СОЖ, затем за избавление от них. При сухом резании эти траты обнуляются. Нет нужды содержать станции очистки эмульсии, вызывать лицензированные компании по вывозу отходов, оплачивать регламентируемую переработку – бюджет этих операций может составлять сотни тысяч долларов в год для крупного завода. Отмена этих расходов напрямую повышает прибыльность производства или высвобождает средства на другие нужды (например, на покупку современного инструмента).

Кроме явных статей бюджета, существуют скрытые и косвенные экономические эффекты. Улучшение условий труда (отсутствие вредных аэрозолей) потенциально уменьшает выплаты по страховкам и больничным листам, повышает продуктивность персонала, что экономически выгодно. Сокращение времени простоя станков (как обсуждалось выше) увеличивает фонд полезного времени оборудования – больше деталей производится в единицу времени, выше оборачиваемость, прибыль с единицы оборудования растёт. Также, сухое производство проще стандартизировать и расширять: не нужны инфраструктурные инвестиции в системы охлаждения (резервуары, трубопроводы), цеха могут быть компактнее и гибче. Отпадает потребность закупать и хранить большие объёмы химических продуктов (масел, концентратов, реагентов) – снижаются складские расходы, уменьшается замораживание оборотных средств.

Для количественной иллюстрации можно рассмотреть гипотетический расчет: пусть годовой расход СОЖ на участке составляет 50 тыс. литров эмульсии, стоимостью \$2 за литр концентрата и \$0,5 за литр воды (с учетом подготовки), то прямые расходы ~\$100 тыс. Дополнительные расходы на электроэнергию, фильтры, присадки, очистку – еще, скажем, \$50 тыс. Утилизация отработки – \$1 за литр, т.е. \$50 тыс. Итого обслуживание СОЖ

~\$200 тыс. в год. Если сухое резание увеличит расход пластин на \$20 тыс., итоговая экономия всё равно ~\$180 тыс./год. Реальные цифры зависят от масштаба, но тенденция очевидна: снижение себестоимости обработки при отказе от СОЖ весьма значительно. Это особенно актуально в условиях ужесточения конкуренции и необходимости сокращать издержки производства.

Таким образом, экономическая выгода сухого резания складывается из: (a) ликвидации затрат на приобретение, подготовку и утилизацию СОЖ; (b) сокращения времени и трудозатрат на вспомогательные операции; (c) возможного роста производительности; (d) уменьшения социальных и экологических платежей. Эти факторы делают технологию сухого резания финансово привлекательной, особенно при крупносерийном производстве, где накопленный эффект экономии многократно масштабируется.

Улучшение условий труда и промышленной безопасности

Отказ от применения смазочно-охлаждающих жидкостей приносит ощутимые улучшения условий труда для операторов и обслуживающего персонала. Металлообработка с обильным охлаждением традиционно связана с рядом вредных и опасных факторов на рабочем месте, и устранение источника этих факторов (СОЖ) позитивно сказывается на промышленной гигиене и безопасности.

Главное преимущество – исчезает масляный аэрозоль в воздухе производственного помещения. При классической мокрой обработке вращающиеся инструменты и вылетающая стружка образуют облако мелких капель эмульсии, которые могут распространяться далеко за пределы станка. Рабочие вынуждены вдыхать этот аэрозоль, капли оседают на коже. Доказано, что длительный контакт с эмульсиями вызывает дерматиты, аллергические реакции, заболевания дыхательных путей и даже увеличивает риск онкологических заболеваний из-за присутствия нефтепродуктов. Снижение содержания масляного тумана до безопасных уровней – сложная задача, требующая герметичных кожухов и мощной вентиляции. При сухом резании данная проблема решается сама собой: воздух остаётся практически свободным от взвешенных масел. Это ведёт к улучшению здоровья операторов: уменьшается частота кожных заболеваний (напомним, до 80% кожных проблем у станочников было связано именно с СОЖ), снижается нагрузка на дыхательную систему. В отсутствие масляных паров снижается и общий дискомфорт – пропадает запах эмульсии, который многим неприятен.

Второй существенный плюс – чистота и безопасность рабочего места. Масло и эмульсии, распыляемые в зоне резания, оседают на полу, делая его скользким, что грозит травмами от падений. Также брызги горячей эмульсии могут попадать на кожу и вызывать ожоги или раздражение. В сухом производстве оборудование и полы остаются сухими, проще содержать их в чистоте. Убирается один из источников травматизма – масляные лужи и

скользящая пленка на поверхностях. Персонал меньше контактирует с химическими веществами: при обслуживании станка не нужно залезать внутрь, вычерпывая отработанную эмульсию или меняя её – эти операции нередко неприятны и вредны. Соответственно, возрастает удовлетворённость трудом и мотивация рабочих, что отмечается предприятиями, перешедшими на сухую технологию.

Кроме гигиенических аспектов, улучшение условий проявляется и в повышении общей безопасности. Отсутствие горючих жидкостей рядом с режущей зоной уменьшает риск возгорания. Хотя сами по себе металлорежущие эмульсии обычно водные и с трудом горят, однако присутствие масляной фазы и горячих поверхностей создаёт потенциальную пожароопасность – например, скопление масляного тумана может воспламениться от искры. Убирая эти жидкости, мы устраняем и эту опасность. К тому же, сухая стружка легче охлаждается и не вспыхивает, в то время как пропитанная маслом стружка способна тлеть и гореть (особенно при обработке легковоспламеняющихся металлов вроде магния, где применение водяной СОЖ само по себе ограничено по причине риска возгорания водородной смеси).

Стоит упомянуть и психологический комфорт: чистое, незагрязненное масляной пленкой оборудование, отсутствие испарений – всё это создает более приятную рабочую обстановку. Оператор лучше видит зону резания, так как её не закрывает поток жидкости, что важно при тонких настройках и наладке. Меньше посторонних запахов и шумов (шум от помпы, плеск жидкости) – производственная среда становится ближе к “сухому” чистому цеху, чем к “мокрому” цеху с туманом и лужами. Конечно, сухое резание тоже имеет свои факторы (шум от резания металла без демпфирования жидкостью может быть выше, отлет горячей стружки требует ограждений), однако эти моменты эффективно контролируются стандартными средствами (экраны, кожухи, звукопоглощающие кожухи).

Наконец, улучшение условий труда – это не только благо для работников, но и выгода для предприятия: сокращаются выплаты за вредность, уменьшается текучесть кадров, повышается имидж компании как ответственной в отношении безопасности труда. Сегодня многие заказчики и аудиторы обращают внимание на социальную устойчивость производства. Внедрение безвредных технологий, к которым относится сухое резание, становится частью корпоративной ответственности и критериев оценки поставщиков.

Таким образом, отказ от СОЖ делает производство более безопасным, чистым и комфортным для людей. Убираются многие хронические проблемы классических цехов металлообработки – вредные выбросы, скользкий пол, контакт с едкими химикатами. Это является существенным нематериальным аргументом в пользу перехода на сухие и минимально-смазочные технологии.

Будущие тенденции и перспективы развития сухого резания

Технология сухого резания уже прочно заняла место в современном машиностроении, однако её развитие продолжается, охватывая новые материалы, инструменты и методы. Ниже обозначены ключевые перспективные направления, которые позволят расширить область применения сухого резания и повысить его эффективность в будущем:

Дальнейшее совершенствование покрытий. Покрытия останутся главным “союзником” сухого резания. В фокусе исследований – самосмазывающиеся и нанокompозитные покрытия нового поколения. Уже сейчас испытываются многослойные структуры, где чередуются твёрдые слои (TiAlN, AlCrN и др.) и слои с вкраплениями твёрдых смазок (MoS₂, графит). Идея в том, чтобы при износе покрытия на поверхности постоянно выделялся смазочный компонент, уменьшая трение – своего рода “автосмазка” на уровне микроструктуры. Нанокompозитные покрытия, состоящие из нанокристаллитов карбидов/нитридов в аморфной матрице, обещают экстремальную твёрдость при низком трении. Хотя таких коммерческих покрытий пока немного, исследования показывают многообещающие результаты, особенно при сухом высокоскоростном резании. Также возможно широкое применение алмазных и алмазоподобных покрытий по новым технологиям, обеспечивающих лучшую адгезию и термостойкость, чтобы покрывать ими не только инструмент для алюминия, но и для стали.

Новые инструментальные материалы. Наряду с улучшением традиционных карбидов, происходит возврат интереса к использованию керамических и сверхтвёрдых режущих материалов ради их превосходной работы без охлаждения. Можно ожидать появления коммерчески доступных микро- и наноструктурированных керамик: например, керамики с наночастицами нитрида кремния и карбида титана в микрозернистой матрице. Такие материалы уже продемонстрировали в лаборатории повышенную твёрдость, износостойкость и теплопроводность (для отвода тепла со режущей кромки) относительно обычных керамик. Если их удастся масштабировать в промышленное производство пластин, они могут значительно расширить применение сухого точения тяжелообрабатываемых материалов. Ещё одно направление – усовершенствованные поликристаллические сверхтвёрдые вставки. Например, появляются новые композиции кубического нитрида бора, связанного тугоплавкими сплавами, рассчитанные специально на прецизионное сухое точение твердых сплавов (HRC 70 и выше) без охлаждения. Ожидается рост применения PCD-инструмента для цветных металлов в условиях минимальной смазки вместо дорогих эмульсий (особенно в электронике и авиакосмическом машиностроении, где чистота важна).

Прогресс в конструктивных решениях. В будущем инструменты будут становиться “умнее” и адаптивнее к сухим условиям. Одно из вероятных

направлений – интегрированные системы охлаждения в инструменте. Это может быть реализация микроканалов с текучей средой внутри тела инструмента (например, с обращающимся охлаждающим газом или фазопереходными материалами, как теплоотводящие трубки). Такие инструменты отводили бы тепло от кромки пассивно, без внешнего подвода СОЖ, и продлевали бы жизнь инструмента. Концепция VRCT-инструментов (с контролируемой длиной контакта) также будет развиваться: возможно появление стандартных пластин со специальной криволинейной кромкой, минимизирующей контакт со стружкой и тем самым снижающей нагрев. Кроме того, ожидается дальнейшее внедрение микротекстурирования как части промышленного изготовления инструмента: лазерная или электрохимическая обработка режущих пластин перед нанесением покрытия, чтобы задать оптимальную текстуру для сухого трения. Уже показано, что текстурированные+покрытые инструменты превосходят нетекстурированные в сухом резании по износостойкости. Возможно, появятся рекомендации и стандарты по выбору формы и параметров текстуры под разные материалы (пока единых критериев нет).

Комбинация технологий (гибридные процессы). Для самых сложных случаев сухое резание может дополняться внешними источниками энергии – так называемые энерго-ассистированные методы. Уже проводятся эксперименты по лазерно-ассистированному резанию (LAM), когда перед резцом локально нагревают материал лазером, снижая его сопротивление резанию. Это позволяет резать закаленную сталь сухо, как масло, хотя инструмент работает в раскаленной зоне. Другой пример – ультразвуковая вибрационная подача (UVAM): наложение высокочастотной микровибрации на резец снижает силы трения и облегчает отделение стружки, что улучшает условия при сухом резании труднообрабатываемых материалов. Эти подходы пока не массовы, но показывают, как сочетание механической обработки с другими физическими воздействиями может устранить необходимость в смазке. В перспективе, гибридные процессы (например, сухое точение + направленный лазерный подогрев, сухое фрезерование + криогенный поддув инертного газа) могут занять свою нишу в обработке особо капризных материалов, где чисто сухое резание пока затруднено.

Цифровизация и мониторинг. С приходом индустрии 4.0 возможен рост систем мониторинга процесса, которые особенно полезны при сухом резании, где допускать перегрузку инструмента опасно. На станках появятся датчики вибрации, акустической эмиссии, температуры, позволяющие в режиме реального времени контролировать состояние режущей кромки и качество поверхности без СОЖ. Это даст возможность максимально приблизить режимы резания к предельно допустимым в сухих условиях, не рискуя аварийным выходом инструмента из строя. Алгоритмы самонастройки (machine learning)

могут оптимизировать параметры резания под сухой процесс на основе большой базы данных, что сделает внедрение этой технологии ещё проще.

Расширение областей применения. Если сегодня сухое резание наиболее широко используется в точении и фрезеровании стали, чугуна, то перспективно его распространение на другие операции и материалы. Например, сухое сверление – традиционно при сверлении часто требовалось охлаждение для выноса стружки, но с появлением новых геометрий сверл, покрытий и методов минимальной смазки, становится реальностью сверление глубоких отверстий почти без СОЖ. Также сухое шлифование – сейчас интенсивное шлифование требует охлаждения, однако переход от шлифования к сверхтвёрдому точению (hard turning) частично решает задачу. Продвижение сухих технологий в области высокоточных и чистовых операций, таких как хонингование, возможно через применение минимальной смазки или твёрдых смазок. Кроме того, новые материалы заготовок, такие как композиты, требующие чистоты (например, в авиации), сразу проектируются под сухую или MQL-обработку, чтобы исключить проблемы совместимости с жидкостями.

В заключение, можно утверждать, что сухое резание из вспомогательного тренда превращается в неотъемлемую часть стратегии устойчивого производства. Интеграция новых инструментальных решений, поддержка со стороны автоматизации и оцифровки, а также объективные требования снижения издержек и экологических рисков – всё это гарантирует дальнейшее развитие и распространение данной технологии. Машиностроительные предприятия будущего, стремящиеся к нулевым выбросам и максимальной эффективности, будут всё чаще строить процессы вокруг сухой или минимально-смазочной обработки, извлекая выгоду как для бизнеса, так и для окружающей среды.

ССЫЛКИ:

1. Ishfaq, K. et al. "Sustainable Machining of Steels – A Detailed Review." *Materials*, vol. 14, no. 18, 2021, pp. 1–27. pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34211111
2. Benes, J. "Cutting The Coolant." *American Machinist*, Aug. 2007. [americanmachinist.com](https://www.americanmachinist.com/2007/08/cutting-the-coolant/)
3. Batzer, S. "The Dry Cure for Coolant Ills." *Cutting Tool Engineering*, June 1998. [ctemag.com](https://www.ctemag.com/articles/1998/06/the-dry-cure-for-coolant-ills/)
4. Pawanr, S., and Gupta, K. "Dry Machining Techniques for Sustainability in Metal Cutting: A Review." *Processes*, vol. 12, no. 2, 2024, pp. 1–27. [mdpi.com](https://www.mdpi.com/2297-9098/12/2/1)
5. Albano, W. et al. "Development of Self-Lubricating Cemented Carbide." *Proc. of Int. Conf. Cutting Tools, 2023* (preprint on SSRN). [papers.ssrn.com](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4688888)

6. American Machinist editors. "Cutting Fluids Pros and Cons." American Machinist, 2007.americanmachinist.comamericanmachinist.com
7. Kumar, S. et al. "Sustainable Machining: Advances in Minimum Quantity Lubrication." Journal of Cleaner Production, vol. 135, 2016, pp. 127–140.americanmachinist.comamericanmachinist.com
8. Khan, A. et al. "Effect of Tool Surface Texturing in Dry Cutting." Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 107, 2020, pp. 4547–4561.mdpi.com
9. Uddin, M. et al. "Performance of Coated vs Uncoated Tools in Dry Machining of Aluminum." Materials Today: Proceedings, vol. 11, 2019, pp. 505–510.mdpi.commdpi.com
10. Ford Motor Co. "MQL Implementation Results." Aerospace Manufacturing & Design, 2011.cnccookbook.com