

Современные тенденции применения смазочно-охлаждающих технологических средств при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов

© А.В. Кирейнов, В.Б. Есов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены смазочно-охлаждающие технологические средства, используемые при резании труднообрабатываемых материалов для обеспечения значительной стойкости инструмента и требуемого качества обработанной поверхности. Они должны обладать хорошими как функциональными, так и эксплуатационными свойствами, обеспечивающими возможность их применения в условиях современного производства с учетом экологических, технологических и экономических требований. Проведен обзор отечественной и зарубежной литературы, посвященной смазочно-охлаждающим технологическим средствам, используемым при резании труднообрабатываемых материалов. Определены основные тенденции применения указанных средств при лезвийной обработке таких материалов в мировой практике.

Ключевые слова: обработка резанием, труднообрабатываемые материалы, смазочно-охлаждающие технологические средства, титановые сплавы, коррозионно-стойкие стали

Введение. Труднообрабатываемые материалы (ТМ) широко применяют во многих отраслях промышленности для изготовления деталей, работающих в агрессивной среде, при высоких температурах и больших нагрузках [1, 2]. К ТМ относят титановые сплавы, коррозионно-стойкие, жаропрочные, жаростойкие и высокопрочные стали.

Для обработки резанием ТМ характерны следующие особенности: высокая температура в зоне контакта инструмента и заготовки, большие силы резания, образование нароста на режущей кромке инструмента, его адгезионный, диффузионный и абразивный износ [1, 3, 4]. Однако существует ряд мер, повышающих эффективность обработки резанием: оптимизация режимов резания, совершенствование геометрических параметров режущей части инструмента, материалов, из которых он изготовлен, и защитных покрытий, а также использование смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).

Применение СОТС при обработке резанием ТМ позволяет существенно увеличить стойкость инструмента и обеспечить хорошее качество обработанной поверхности детали. Смазочно-охлаждающие технологические средства разделяют на жидкие, газообразные, пластичные и твердые [1, 5, 6]. В современном машиностроении в основном применяют жидкие СОТС. Функциональные и эксплуатационные свойства

СОТС должны обеспечивать возможность их использования в условиях современного производства с учетом экологических, технологических и экономических требований [7].

Данная работа посвящена анализу современных СОТС и способов их применения при лезвийной обработке резанием ТМ.

Смазочно-охлаждающие жидкости. Различают два класса смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ): *масляные* и *водные* (рис. 1) [1, 5, 6]. При обработке резанием применяют масляные СОЖ с присадками различного назначения (антифрикционными, противоизносными, противозадирными, антиокислительными, моющими, антипенными, противотуманными, антикоррозионными). Масляные СОЖ обладают хорошими смазочными свойствами, но имеют такие недостатки (таблица), как низкая охлаждающая способность, пожароопасность, вредное воздействие паров масла на человека [1, 8].

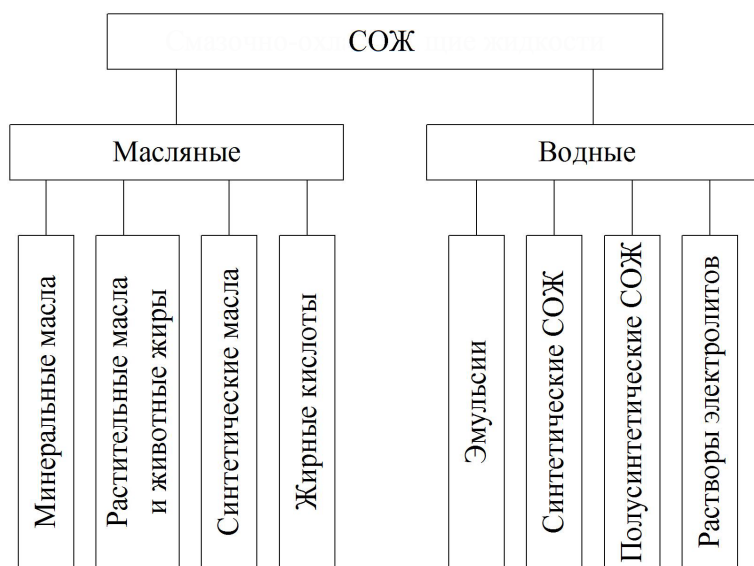


Рис. 1. Классификация СОЖ

В последнее десятилетие наблюдается тенденция применения СОТС на основе растительных масел, использование которых оправдано высокой биоразлагаемостью и экологичностью [9–11]. Растительные масла наиболее пригодны для чистовых работ. По сравнению с минеральными маслами они обладают большей смачивающей способностью. Однако в процессе эксплуатации растительных масел в качестве СОТС выявляются такие недостатки, как низкая окислительная стойкость, ухудшение трибологических характеристик при повышенных температурах, увеличение вязкости (загущение) при продолжи-

тельной эксплуатации [4]. В связи с этим доля применяемых на производстве минеральных масел остается значительной благодаря их химической стабильности и возможности повторного использования.

Сравнительная характеристика СОЖ

Тип СОЖ	Свойства			Основные недостатки
	смазочные	охлаждающие и моющие	стойкость к биопоражению	
Чистые масла	●●●●	●	—	Слабые охлаждающие и моющие свойства, пожароопасность, испаряемость, низкие скорости резания
Водосмешиваемые на основе минерального масла (эмульсии)	●●●	●●●	●	Коррозионная активность, рост бактерий
Полусинтетические	●●	●●●	●●●	Возможность пенообразования, влияние жесткости воды на стабильность СОЖ, легкость загрязнения
Синтетические	●	●●●	●●●●	Сравнительно слабые смазывающие свойства, легкость загрязнения

Водные СОЖ в литературе классифицируют как водосмешиваемые на основе минерального масла (масляные эмульсии), синтетические и полусинтетические СОЖ, растворы электролитов [5, 6, 12, 13].

Водные СОЖ обладают рядом преимуществ перед масляными (см. таблицу): более высокими охлаждающими и моющими свойствами, пожаробезопасностью, меньшей опасностью для здоровья рабочего и оператора. К недостаткам водных СОЖ относятся сравнительно низкие смазочные свойства, невозможность применения в особо тяжелых условиях обработки резанием и сложность утилизации.

Наибольшее распространение на современном производстве получили масляные эмульсии, синтетические и полусинтетические СОЖ.

Эмульсии состоят из масляной основы (70...85 %), эмульгатора, ингибиторов коррозии, биоцидов, антипенных добавок, противоизносных и противозадирных присадок [1]. Главная проблема при эксплуатации эмульсий — биопоражение, которое приводит к ухудшению свойств жидкости [1, 12, 13].

Синтетические СОЖ представляют собой смесь из органических и неорганических компонентов и функциональных присадок. Основ-

ная особенность синтетических СОЖ заключается в том, что в их составе не содержится минеральное масло. Синтетические СОЖ обладают меньшей смазывающей способностью, чем другие. В связи с этим они имеют ограничения по применению на производстве и используются при легких условиях обработки резанием [12, 13].

Полусинтетические СОЖ содержат маловязкие минеральные или синтетические масла (их в СОЖ меньше, чем в эмульсиях), а также набор функциональных присадок, обеспечивающих смазывание, защиту от коррозии. Кроме того, по сравнению с масляными эмульсиями полусинтетические СОЖ более экологически чистые, а по сравнению с синтетическими обладают лучшей смазывающей способностью.

Важное преимущество синтетических и полусинтетических СОЖ заключается в том, что они меньше подвержены биопоражению [12, 13]. Однако указанные СОЖ имеют следующие недостатки: их стоимость относительно высока, они легко загрязняются, их стабильность зависит от жесткости воды.

В последние годы в промышленно развитых странах ужесточают требования к СОТС в области экологии, токсикологии и санитарной гигиены [12–14]. В публикациях [8, 12, 13] отмечено, что содержащиеся в СОЖ присадки на основе хлора, серы и фосфора оказывают вредное воздействие на человека. В связи с этим появляется необходимость минимизации или замены вредных компонентов на экологически чистые, отвечающие существующим требованиям и обеспечивающие необходимые функциональные свойства СОЖ.

Перспективные способы подачи СОЖ. Эффективность применения СОЖ сильно зависит от способа ее подачи в зону резания. К наиболее распространенным относятся следующие способы: свободно падающей струей (поливом); под давлением через сопловые насадки; под высоким давлением через каналы в инструменте с выходом в зону резания; в распыленном состоянии [5, 6].

Проникновение среды в зону резания зависит как от физических свойств СОЖ, так и от способа подвода ее в зону резания. Способ подачи поливом прост (рис. 2, а), но имеет следующие недостатки: малая скорость струи, большой расход и разбрызгивание жидкости [14]. При подаче поливом СОЖ отбирает теплоту от обрабатываемой поверхности заготовки, приближающейся к зоне резания, от поверхностей нагретой стружки, поверхностей резца, которые не контактируют со стружкой и заготовкой, и от обработанной поверхности. Однако степень влияния этих тепловых потоков неодинакова. В работах [15, 16] показано, что наибольшую роль при охлаждении играет отвод теплоты от контактной площадки резца и стружки через инструмент в охлаждающую среду. Чем интенсивнее теплообмен между свободными поверхностями инструмента и жидкостью, тем ниже температура контактной площадки на передней поверхности инструмента.

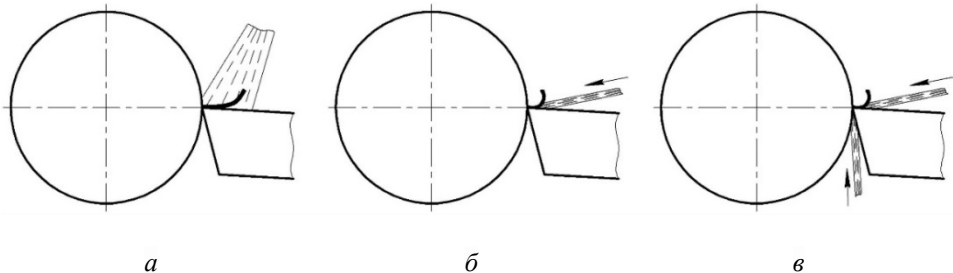


Рис. 2. Направление подачи струи СОЖ:

а — подача поливом; *б* — подача под высоким давлением на переднюю поверхность инструмента; *в* — подача под высоким давлением на переднюю и заднюю поверхности инструмента

Исследования показывают, что эффективность смазочного и охлаждающего действия усиливается при подаче СОЖ в контактную зону под давлением, так как это способствует лучшему проникновению среды на тяжело нагруженные контактные поверхности [2, 3, 13, 17]. Струю СОЖ при подаче под высоким давлением направляют в зону между нижней поверхностью стружки и передней поверхностью инструмента при давлении 1,5...15 МПа в зависимости от характеристик рабочей станции (рис. 2, *б*). Также используют подачу на заднюю поверхность и на обе поверхности одновременно (рис. 2, *в*) с применением внутреннего подвода СОЖ через инструмент.

Во многих работах отмечается положительный эффект при использовании охлаждения под высоким давлением при обработке титановых сплавов и сплавов на никелевой основе: улучшается дробление стружки, уменьшаются коэффициент трения и температура в зоне резания, увеличивается период стойкости инструмента, обеспечиваются хорошая производительность и стабильность обработки [2, 13, 18, 19]. Кроме того, при прочих равных условиях охлаждение под высоким давлением позволяет увеличить скорость резания на 40 % по сравнению со скоростью резания при охлаждении поливом. Дальнейшее увеличение скорости способствует уменьшению эффективности применения СОЖ.

Несмотря на свои преимущества, способ подачи СОЖ под высоким давлением имеет следующие недостатки: необходимость использования специальных насосов; необходимость тщательной очистки СОЖ, а также точного регулирования давления и направления струи; повышенное разбрызгивание жидкости, требующее применения защитных кабинетов [14].

В последние годы все более широко используют способ подачи СОЖ в распыленном состоянии, также известный как технология минимального количества смазки, или «полусухая» обработка (наиболее распространенное название в зарубежной литературе — *Minimum*

Quantity Lubrication, далее — *MQL*). Технология *MQL* заключается в подаче сверхмалых доз СОЖ в виде аэрозоля в зону контакта режущего инструмента и обрабатываемой детали. В основном для данного метода используют биоразлагаемые масла на растительной основе. Благодаря применению систем *MQL* значительно снижается расход СОЖ, уменьшается вред, наносимый окружающей среде от утилизации смазок [12, 13]. Для сравнения ниже приведен расход СОЖ в зависимости от способа подачи:

Полив СОЖ, подача СОЖ под высоким давлением	10–100 л/мин
<i>MQL</i>	50–100 мл/ч

По сравнению с жидкостным охлаждением метод *MQL* позволяет применять более высокие скорости обработки [12, 13, 17]. В работе [20] отмечено, что при высокоскоростном фрезеровании коррозионно-стойкой стали в случае использования *MQL* происходит уменьшение сил резания, однако при обработке титанового сплава эффект незначителен. При фрезеровании коррозионно-стойкой стали снижается шероховатость поверхности обработанной детали. Зафиксировано уменьшение отслаивания защитного покрытия инструмента при обработке коррозионно-стойкой стали с использованием *MQL* по сравнению с отслаиванием при «сухой» обработке [20].

В работе [21] показано, что подача аэрозоля на переднюю поверхность режущей пластины не привела к значительным результатам при точении стали 100Cr6 (аналог ШХ15); износ инструмента оказался сопоставим с износом при «сухой» обработке. Однако при изменении направления подачи на заднюю поверхность отмечены снижение износа и увеличение периода стойкости инструмента.

Технологию *MQL* используют в тех случаях, когда жидкостное охлаждение недопустимо, а применение «сухого» резания нежелательно. Например, в работе [14] приведены результаты испытаний при фрезеровании пазов фрезами с пластинами из твердого сплава на заготовках из алюминиевого сплава АК6М2. Показано, что без использования СОЖ на режущих кромках происходило образование нароста, в то время как при использовании СОЖ и *MQL* нарост отсутствовал. Образование нароста приводило к ухудшению качества обработанной поверхности. Также отмечено, что применение СОЖ способствовало появлению трещин на режущих поверхностях инструмента, в то время как использование *MQL* позволило уменьшить коэффициент трения между стружкой и поверхностью режущего клина при одновременном уменьшении градиента температур режущих пластин.

Метод *MQL* обладает в большей степени смазывающей, чем охлаждающей способностью. В силу недостаточного охлаждения применение метода лимитировано при обработке ТМ, таких как титановые сплавы и сплавы на никелевой основе [2, 12].

«Сухое» резание. При повышении производительности обработки резанием на современных станках значительно увеличивается расход СОЖ. В литературе отмечено, что в ряде случаев производственные затраты на приобретение и обслуживание СОЖ на предприятиях намного превосходят затраты на инструмент. Высокие эксплуатационные расходы на СОЖ являются одной из основных причин отказа от ее использования при обработке резанием [14].

В публикациях [12, 20, 22, 23] наряду с минимизацией подачи СОТС в зону резания обсуждается возможность обработки резанием без применения СОЖ. Область применения «сухого» резания более узкая по сравнению с областью применения технологии MQL. Метод «сухого» резания в основном используют при обработке стали, алюминиевых сплавов и чугунов [14].

В работах [12, 20, 22, 23] отмечается, что точение и фрезерование без применения СОТС позволяют существенно сократить затраты на процессы обработки и минимизировать загрязнение окружающей среды. Однако данный метод имеет следующие недостатки: нагрев инструмента; сход и накопление стружки; образование наростов на режущих кромках инструмента; появление металлической пыли.

Известно, что применение СОЖ способствует увеличению стойкости инструмента, уменьшению сил резания и шероховатости обрабатываемой детали. При «сухой» обработке температура в зоне резания значительно выше. Вследствие этого уменьшается стойкость инструмента и ухудшается качество обработанной поверхности, затрудняется обеспечение заданной точности обработки [12].

Существует два направления, при которых можно компенсировать исключение СОЖ:

1) использование более износостойких материалов с защитными покрытиями, совершенствование геометрических параметров инструментов, оптимизация режимов резания;

2) реализация циркуляции СОЖ внутри инструмента [12, 14].

В настоящее время при обработке резанием ТМ сохраняется необходимость применения СОЖ. В этих случаях следует выбирать СОЖ, отвечающие современным требованиям производства [14].

Газообразные СОТС. При высокоскоростной механической обработке, такой как твердое точение и высокоскоростное фрезерование, использование жидких СОТС может привести к растрескиванию инструмента вследствие термоудара. По этой причине для охлаждения инструмента при высокоскоростной обработке чаще всего применяют воздушный обдув зоны резания, подачу СОТС в распыленном состоянии (технология MQL) [24].

При замене жидких СОТС на обдув воздухом сокращаются моющие и сушильные операции, уменьшаются затраты на обслуживание системы подачи СОТС. По сравнению с «сухой» обработкой

применение воздушного охлаждения способствует уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности, однако этот метод уступает технологии MQL и жидкостному охлаждению с применением эмульсий [12].

Основной недостаток воздуха в роли СОТС — плохая смазывающая способность. Одним из перспективных методов воздушного охлаждения зоны резания является применение активированных воздушных сред, например охлажденного ионизированного воздуха (ОИВ). Ионизация воздуха обеспечивает смазывающую функцию газообразных СОТС путем образования защитных окисных пленок на поверхностях инструмента [24–28].

Вызывает интерес возможность совместного применения СОЖ и ОИВ при обработке резанием. Эффективность использования подобной комбинации СОТС показана в работах [26, 29].

В работе [24] отмечено, что применение ОИВ при точении стали 30ХГСА резцами из твердого сплава позволило уменьшить износ на 50 % по сравнению с износом в случае «сухой» обработки. При фрезеровании стали 40Х сравнивали влияние ОИВ и охлаждения воздухом на шероховатость поверхности детали. Показано, что применение ОИВ позволило снизить шероховатость поверхности на 10...30 %.

В работе [28] приведены результаты эксперимента при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР. Использование ОИВ позволило уменьшить шероховатость на 30 % и снизить уровень пластической деформации в зоне резания в 1,5 раза по сравнению с аналогичными параметрами при «сухой» обработке.

Для увеличения охлаждающей способности СОТС авторы работы [30] совместили охлаждение сжатым воздухом с технологией MQL. Показано, что при фрезеровании сплава Ti-6Al-4V (аналог ВТ6) наилучшие показатели (шероховатость обработанной поверхности и период стойкости инструмента) были получены при температуре СОТС $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с показателями в случае обработки при температурах 0, -30 и $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также в случае «сухой» обработки и жидкостного охлаждения.

При точении сплава Inconel 718 (аналог ХН45МВТЮБР) установлено увеличение периода стойкости инструмента на 78 % с использованием охлажденного воздуха и на 124 % с применением комбинации технологии MQL с охлажденным воздухом по сравнению с периодом стойкости при подаче СОЖ поливом.

В последние годы активно обсуждается обработка резанием при использовании *криогенного охлаждения* жидким и газообразным азотом или углекислым газом. Криогенная обработка проводится при температуре ниже 120 К. В литературе показано, что применение криогенного охлаждения в определенных случаях позволяет увеличить период стойкости инструмента и повысить производительность за счет увеличения скорости резания [12, 17, 22, 23, 30, 31].

Обработка с использованием криогенного охлаждения сопровождается изменением свойств инструмента и обрабатываемой детали в результате значительного понижения температуры. Низкая температура обработки способствует увеличению твердости, уменьшению деформативности и трещиностойкости обрабатываемого материала [12].

Анализ литературы показал, что не все системы «инструмент – обрабатываемый материал» согласуются с тем или иным способом криогенного охлаждения. Например, в работе [30] отмечено, что применение жидкого азота в качестве СОТС при фрезеровании титанового сплава Ti-6Al-4V позволяет на 30..40 % уменьшить шероховатость обработанной поверхности по сравнению с шероховатостью при «сухой» обработке и применении СОЖ. Однако авторами работы [23] отмечено, что ни жидкий азот, ни газообразный азот не способствовал уменьшению образования нароста и снижению коэффициента трения при испытаниях на трибометре образцов из сплава Ti-6Al-4V с использованием режущих пластин без покрытия. Положительный эффект был получен при испытаниях сплава Inconel 718 с применением режущих пластин с покрытием из нитрида титана (TiN).

В работе [31] показано, что криогенное охлаждение углекислым газом при точении титанового сплава Ti-6Al-4V позволяет увеличить период стойкости инструмента по сравнению с аналогичным показателем при использовании эмульсий. Однако при обработке высокопрочного титанового сплава, такого как Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, потребовалось дополнительное смазывание с применением технологии MQL.

Отрицательная температура СОТС в разной степени влияет на изменение характеристик режущего инструмента и материала обрабатываемой детали [12]. По этой причине для каждой системы «инструмент — обрабатываемый материал» требуется проводить индивидуальные исследования по применению криогенного охлаждения.

На сегодняшний день конечный потребитель криогенного охлаждения не готов принять на себя риски подготовки технологии к серийному использованию. Широкому внедрению метода препятствуют проблемы обеспечения безопасности работ, а также проблема пригодности технологии криогенного охлаждения для разного оборудования [17].

На основе проведенного обзора можно выделить следующие способы повышения эффективности лезвийной обработки ТМ (рис. 3):

- модифицирование СОЖ (применение более эффективных присадок, уменьшение вредного воздействия);
- применение более эффективных способов подачи СОЖ;
- использование «сухого» резания;
- применение газообразных СОТС, криогенное охлаждение.



Рис. 3. Классификация способов, повышающих эффективность лезвийной обработки ТМ

Выбор конкретного типа СОТС и способа подачи зависит от обрабатываемой детали, инструмента и оборудования, на котором проводится обработка. В разных отраслях промышленности предъявляются свои определенные требования к качеству обработанной поверхности деталей и технологическому процессу. В связи с этим важно понимать, в каких границах возможно рациональное применение выбранного СОТС с учетом особенностей отрасли, оборудования, обрабатываемого материала и требований к деталям.

Заключение. Анализ современной отечественной и зарубежной литературы показал, что в последнее время в мировой практике значительная часть исследований в области СОТС сосредоточена на минимизации или исключении применения СОЖ, выборе более эффективных способов их подачи, а также на использовании газообразных СОТС и криогенного охлаждения. Полный отказ от СОЖ при обработке ТМ в настоящее время не представляется возможным, несмотря на недостатки СОЖ и ужесточение экологических требований. При определенных условиях обработки резанием применение СОЖ обеспечивает экономически выгодную эксплуатацию режущего инструмента и хорошее качество обработанной поверхности деталей.

Таким образом, в решении вопроса использования СОЖ существует две стратегии:

- 1) уменьшение или исключение применения СОЖ;
- 2) замена традиционных СОЖ на минеральной основе альтернативными с использованием присадок, которые более эффективны при

обработке резанием и менее вредны для человека и окружающей среды.

Для нашей страны актуально развитие производства конкурентоспособных СОЖ, обеспечивающих исключение зависимости от импортной продукции. Для модифицирования уже имеющихся СОЖ и разработки новых СОЖ, отвечающих современным требованиям, необходимо исследовать влияние СОЖ на эффективность обработки ТМ.

В следующей работе будут рассмотрены вопросы модифицирования СОЖ присадками и их влияние на процессы, происходящие в зоне резания, и окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Энтелис С.Г. *Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием*. Москва, Машиностроение, 1986, 351 с.
- [2] M'Saoubi R., Axinte D., Soo S.L., Nobel C., Attia H., Kappmeyer G., Engin S., Sim W. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2015, vol. 64, no. 2, pp. 557–580.
- [3] Латышев В.Н. *Повышение эффективности СОЖ*. Москва, Машиностроение, 1975, 88 с.
- [4] Вульф А.М. *Резание металлов*. 2-е изд. Ленинград, Машиностроение, 1973, 496 с.
- [5] Древаль А.Е., Скороходов Е.А. *Краткий справочник металлста*. Москва, Машиностроение, 2005, 960 с.
- [6] Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г. *Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2*. Москва, Машиностроение, 2001, 944 с.
- [7] Худобин Л.В., Бердичевский Е.Г. *Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке*. Москва, Машиностроение, 1977, 189 с.
- [8] Емолаева Н.В., Голубков Ю.В., Кушева М.Е. Определение молекулярного состава смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) на масляной основе хромато-масс-спектрометрическим методом. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2010, № 5, с. 34–37.
- [9] Belluco W., De Chiffre L. Performance evaluation of vegetable-based oils in drilling austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 148, no. 2, pp. 171–176.
- [10] Abdalla H.S., Baines W., McIntyre G., Slade C. Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. Part 1. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 34, no. 1–2, pp. 21–33.
- [11] Голубков Ю.В., Еромолаева Н.В., Могусева М.С. Альтернативные смазочно-охлаждающие материалы на основе растительных масел. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*, 2014, № 1, с. 32–35.
- [12] Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, vol. 57, pp. 83–101.
- [13] Debnath S., Reddy M.M., Yi Q.S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 83, pp. 33–47.

- [14] Андреев В.Н., Боровский Г.В., Боровский В.Г., Григорьев С.Н. *Инструмент для высокопроизводительного и экологически чистого резания*. Москва, Машиностроение, 2010, 480 с.
- [15] Резников А.Н. *Теплофизика процессов механической обработки материалов*. Москва, Машиностроение, 1981, 279 с.
- [16] Резников А.Н., Резников Л.А. *Тепловые процессы в технологических системах*. Москва, Машиностроение, 1990, 288 с.
- [17] Pearson D. MQL, When Less Is More. *Machinery Magazine*, 2013, May. URL: <http://content.yudu.com/A25nae/MachinerySuppMay13/resources/14.htm> (дата обращения 05.07.2016).
- [18] Klocke F., Lung D., Cayli T., Döbbeler B., Sangermann H. Evaluation of Energy Efficiency in Cutting Aerospace Materials with High-Pressure Cooling Lubricant Supply. *International Journal of precision engineering and manufacturing*, 2014, vol. 15, no. 6, pp. 1179–1185.
- [19] Ayed Y., Germain G., Ammar A., Furet B. Tool wear analysis and improvement of cutting conditions using the high-pressure water-jet assistance when machining the Ti17 titanium alloy. *Precision Engineering*, 2015, vol. 42, pp. 294–301.
- [20] Okada M., Hosokawa A., Asakawa N., Ueda T. End milling of stainless steel and titanium alloy in an oil mist environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, no. 9–12, pp. 1255–1266.
- [21] Attanasio A., Gelfi M., Giardini C., Remino C. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. *Wear*, 2006, vol. 260, no. 3, pp. 333–338.
- [22] Munoz-Escalona P., Shokrani A., Newman S.T. Influence of cutting environments on surface integrity and power consumption of austenitic stainless steel. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, vol. 36, pp. 60–69.
- [23] Courbon C., Pusavec F., Dumont F., Rech J., Копач J. Tribological behavior of Ti6Al4V and Inconel 718 under dry and cryogenic conditions – Application to the context of machining with carbide tools. *Tribology International*, 2013, vol. 66, pp. 72–82.
- [24] Есов В.Б., Климочкин К.О., Муратов К.Р., Хурматуллин О.Г. Применение охлажденного ионизированного воздуха при высокоскоростном фрезеровании. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2011, т. 13, № 4–4, с. 957–959.
- [25] Наумов А.Г., Клюев М.В., Латышев В.Н., Курапов К.В., Ткачук О.В. Применение эффекта Ранка — Хилша при лезвийном резании металлов. *Металлообработка*, 2010, № 5, с. 59.
- [26] Латышев В.Н., Наумов А.Г., Комельков В.А. Влияние микродоз масла И-20А на эффективность ионизированной воздушной СОТС. *Металлообработка*, 2006, № 5–6, 35–36 с.
- [27] Латышев В.Н., Наумов А.Г. Трибология и проблемы СОТС. *Инструмент и технологии*, 2004, № 18, с. 117–129.
- [28] Кириллов А.К. Качество обработанной поверхности детали при использовании экологически чистого резания. *Вестник МГТУ «Станкин»*, 2011, № 3 (15), с. 70–73.
- [29] Бодарева А.В., Есов В.Б., Климочкин К.О., Мельников Э.Л. Способы снижения интенсивности изнашивания алюминиевых сплавов при прокатке. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2011, № 12, с. 19–23.
- [30] Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti–6Al–4V titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, vol. 21, pp. 172–179.

- [31] Biermann D., Abrahams H., Metzger M., Biermann D., Abrahams H., Metzger M. Experimental investigation of tool wear and chip formation in cryogenic machining of titanium alloys. *Advances in Manufacturing*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 292–299.

Статья поступила в редакцию 26.12.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кирейнов А.В., Есов В.Б. Современные тенденции применения смазочно-охлаждающих технологических средств при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-2-1591>

Кирейнов Алексей Валерьевич — аспирант кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: alexkireinov@gmail.com

Есов Валерий Балахметович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: esov@bmstu.ru

Contemporary trends in cutting fluid usage for high-performance machining of materials with poor machinability

© A.V. Kireynov, V.B. Esov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Cutting fluids (CF) are integral to machining of poorly machinable materials (PMM), ensuring significant tool durability and high quality finish of the treated surface. CF should possess both good functionality and a combination of performance characteristics allowing them to be used in contemporary manufacturing, taking into account environmental, technologic and economic requirements. The article presents a review of Russian and international publications dealing with CF used in machining of materials with poor machinability. We determine the primary trends in using CF during machining PMM in the global practice and outline their advantages and disadvantages.

Keywords: machining, poorly machinable materials, cutting fluids, titanium alloys, corrosion-resistant steel

REFERENCES

- [1] Entelis S.G. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva dlya obrabotki metallov rezaniem* [Cutting fluids for metal machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 351 p.
- [2] M'Saoubi R., Axinte D., Soo S.L., Nobel C., Attia H., Kappmeyer G., Engin S., Sim W. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2015, vol. 64, no. 2, pp. 557–580.
- [3] Latyshev V.N. *Povyshenie effektivnosti SOZh* [Increasing cutting fluid efficiency]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 88 p.
- [4] Vulf A.M. *Rezanie metallov* [Metal machining]. 2nd ed. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973, 496 p.
- [5] Dreval A.E., Skorokhodov E.A. *Kratkiy spravochnik metallista* [Metalworker's concise handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 960 p.
- [6] Dalskiy A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook for mechanical engineering technologists]. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, 944 p.
- [7] Khudobin L.V., Berdichevskiy E.G. *Tekhnika primeneniya smazochno-okhlazhdayushchikh sredstv v metalloobrabotke* [Cutting fluid application technology for metal machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 189 p.
- [8] Ermolaeva N.V., Golubkov Yu.V., Kushcheva M.E. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa — Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2010, no. 5, pp. 34–37.
- [9] Belluco W., De Chiffre L. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 148, no. 2, pp. 171–176.
- [10] Abdalla H.S., Baines W., McIntyre G., Slade C. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 34, no. 1–2, pp. 21–33.
- [11] Golubkov Yu.V., Ermolaeva N.V., Moguseva M.S. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa — Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2014, no. 1, pp. 32–35.
- [12] Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, vol. 57, pp. 83–101.

- [13] Debnath S., Reddy M.M., Yi Q.S. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 83, pp. 33–47.
- [14] Andreev V.N., Borovskiy G.V., Borovskiy V.G., Grigorev S.N. *Instrument dlya vysokoproizvoditelnogo i ekologicheskhi chistogo rezaniya* [Tools for high-performance environmentally friendly cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 480 p.
- [15] Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of material machining processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 279 p.
- [16] Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in engineering systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 288 p.
- [17] Pearson D. MQL, When Less Is More. *Machinery Magazine*, 2013, May. Available at: <http://content.yudu.com/A25nae/MachinerySuppMay13/resources/14.htm> (accessed 5 July, 2016).
- [18] Klocke F., Lung D., Cayli T., Döbbeler B., Sangermann H. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2014, vol. 15, no. 6, pp. 1179–1185.
- [19] Ayed Y., Germain G., Ammar A., Furet B. *Precision Engineering*, 2015, vol. 42, pp. 294–301.
- [20] Okada M., Hosokawa A., Asakawa N., Ueda T. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, no. 9–12, pp. 1255–1266.
- [21] Attanasio A., Gelfi M., Giardini C., Remino C. *Wear*, 2006, vol. 260, no. 3, pp. 333–338.
- [22] Munoz-Escalona P., Shokrani A., Newman S.T. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, vol. 36, pp. 60–69.
- [23] Courbon C., Pusavec F., Dumont F., Rech J., Kopac J. *Tribology International*, 2013, vol. 66, pp. 72–82.
- [24] Esov V.B., Klimochkin K.O., Muratov K.R., Khurmatullin O.G. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk — Proceedings of the Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 4–4, pp. 957–959.
- [25] Naumov A.G., Klyuev M.V., Latyshev V.N., Kurapov K.V., Tkachuk O.V. *Metalloobrabotka — Metalworking*, 2010, no. 5, p. 59.
- [26] Latyshev V.N., Naumov A.G., Komelkov V.A. *Metalloobrabotka — Metalworking*, 2006, no. 5–6, pp. 35–36.
- [27] Latyshev V.N., Naumov A.G. *Instrument i tekhnologii — Tools and technologies*, 2004, no. 18, pp. 117–129.
- [28] Kirillov A.K. *Vestnik MGTU “Stankin” — Vestnik “MSTU “STANKIN”*, 2011, no. 3 (15), pp. 70–73.
- [29] Bodareva A.V., Esov V.B., Klimochkin K.O., Melnikov E.L. *Remont, vostanovlenie, modernizatsiya — Repair, reconditioning, modernization*, 2011, no. 12, pp. 19–23.
- [30] Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, vol. 21, pp. 172–179.
- [31] Biermann D., Abrahams H., Metzger M., Biermann D., Abrahams H., Metzger M. *Advances in Manufacturing*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 292–299.

Kireynov A.V., post-graduate student, Department of Material Processing Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: alexkireinov@gmail.com

Esov V.B., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Material Processing Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: esov@bmstu.ru