

## ВЛИЯНИЕ СОЖ И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В рамках данных исследований были проведены экспериментальные исследования влияния применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) различных типов — синтетической «БИОСИЛ-С», полусинтетической «СП-3» и водоэмульсионной «Смальта-4» — на шероховатость обработанной поверхности алюминиевой заготовки при фрезерной обработке. Оценка шероховатости обработанной поверхности выполнялась по параметру Ra с помощью портативного профилометра модели MarSurf PS1. В результате исследований установлено, что СОЖ по-разному влияют на качество получаемой поверхности. Наилучшее качество поверхности было получено при скорости резания  $V=283$  м/мин и подаче  $S=0,02$  мм/зуб с применением СОЖ марки «БИОСИЛ-С», что обусловлено рациональными режимами резания и физическими свойствами СОЖ.

**Ключевые слова:** СОЖ, эффективность СОЖ, плотность, эмпирическая зависимость.

**Введение.** Обработка металлов резанием сопровождается множеством физических процессов, происходящих в зоне резания. К таким процессам относятся высокая температура, трение между стружкой и режущим инструментом по передней поверхности, трение между заготовкой и режущим инструментом по задней поверхности, внутреннее трение при пластической деформации материала обрабатываемой заготовки, большая сила резания, колебания режущего инструмента и заготовки. Происходящие процессы приводят к быстрому износу режущего инструмента и к снижению качества обрабатываемой заготовки. Одними из наиболее распространенных материалов, применяемых в машиностроении, являются алюминиевые сплавы. Обработка данных сплавов в большинстве случаев сопровождается появлением нароста на передней поверхности режущего инструмента, что негативно сказывается на качестве получаемой поверхности [1–4].

**Постановка задачи.** Оценить абсолютно весь ассортимент предлагаемых СОЖ невозможно. Поэтому необходимо систематизировать имеющиеся типы СОЖ и из них выбрать несколько марок того типа, который наиболее часто применяют при резании. Водные СОЖ обладают высоким охлаждающим действием и достаточным смазочным [5], вследствие чего они более распространены. Данный тип СОЖ, в свою очередь, классифицируют на водоэмульсионные, синтетические и полусинтетические.

Водоэмульсионными СОЖ являются смеси минеральных масел, эмульгаторов, веществ-связок, ингибиторов коррозии и различных присадок. Кон-

центраты данного типа СОЖ содержат 25–50 % воды [5].

Синтетические СОЖ изготавливаются на основе либо водорастворимых полимеров, либо композиций поверхностно-активных веществ (ПАВ) [5].

Концентраты полусинтетических СОЖ содержат 15–30 % минеральных масел [5].

В целях эксперимента были выбраны по одной марке СОЖ, наиболее распространенных на предприятиях, из каждого типа классификации. Это смазочно-охлаждающая жидкость «БИОСИЛ-С» (синтетическая СОЖ), смазка технологическая «СП-3» (полусинтетическая СОЖ), жидкость смазочно-охлаждающая «Смальта-4» (водоэмульсионная СОЖ). Данные марки СОЖ производит предприятие ООО «НПО Промэкология».

При лезвийной обработке улучшение качества поверхности зависит от способа подачи СОЖ в зону резания (табл. 1) [5].

Из известных способов подачи СОЖ контактное смачивание и периодическую подачу на инструмент применяют ситуативно. Остальные способы используются довольно широко.

Наиболее распространенным является способ подачи СОЖ поливом. Данный способ универсален и конструктивно прост.

Эффективность подачи СОЖ поливом зависит непосредственно от расхода СОЖ, подаваемой к зоне резания, размеров, формы, траектории струи. Струя должна перекрывать всю зону контакта инструмента и заготовки. Подача СОЖ должна быть непрерывной, в первую очередь на нагретые участки инструмента, и лишь затем на стружку и заготовку.

Таблица 1

**Способы подачи СОЖ в зону резания  
при лезвийной обработке**

Номер способа	Способ подачи
1	Свободно падающая струя (полив)
2	Под давлением через сопловые насадки (напорная струя)
3	В распыленном состоянии (струя воздушно-жидкостной смеси)
4	Под давлением, через каналы в инструменте с выходом в зону резания
5	Под давлением, через каналы в инструменте без выхода в зону резания
6	Контактное смачивание
7	Периодическая подача на инструмент перед обработкой (в распыленном состоянии, окунанием, нанесением кисточкой или тампоном, из масленки и т.д.)

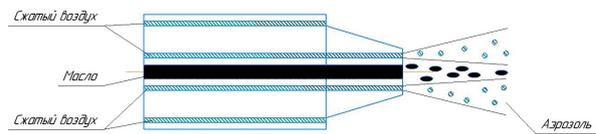
Эффективность подачи СОЖ напорной струей выше, чем подача СОЖ поливом. Однако ее реализация сложнее и дороже, особенно при применении высоконапорной струи, так как увеличиваются требования к чистоте СОЖ.

Недостатками напорной и высоконапорной подачи СОЖ является то, что при лезвийной обработке струя подается в полузакрытое пространство между передней и задней поверхностями инструмента и стружкой. В образованном пространстве скорость движения СОЖ меньше, чем на выходе из сопла. Это существенно ослабляет охлаждающее воздействие СОЖ, ведь чем больше давление жидкости, тем больше ответное давление в пространстве между инструментом и стружкой, а этот фактор снижает фактическую скорость СОЖ.

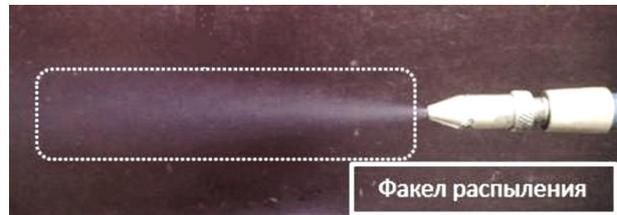
Подача СОЖ через каналы в инструменте без выхода в зону резания применяется только в ситуативных операциях токарной обработки. СОЖ циркулирует внутри инструмента, осуществляя охлаждение контактных площадок инструмента. Такой способ рекомендуется для обработки тонкостенных заготовок из труднообрабатываемых материалов или в случаях, когда наличие СОЖ в зоне резания может негативно сказаться на эксплуатационных свойствах будущих изделий [5].

В связи с развитием технологий и возрастающим вниманием к проблемам защиты окружающей среды большое количество ученых посвящают свои работы внедрению технологии минимальной подачи смазки на металлообрабатывающих операциях. Из-за того, что традиционно применяемые на производстве составы СОЖ изготавливаются в основном из минеральных масел с различными присадками типа органических соединений азота, фосфора, хлора и серы, ущерб наносится не только экологии, но и здоровью рабочих. Данные аспекты способствуют внедрению прогрессивных технологий, которые направлены на повышение эффективности механообработки заготовок и снижение вредного влияния на окружающую среду [6].

Существует несколько способов подвода охлаждающей жидкости в зону резания. Наиболее оптимальным способом подачи СОЖ является си-



**Рис. 1. Принцип работы сопла  
для распыления воздушно-масляной смеси**



**Рис. 2. Область распыления аэрозоля**

стема «масляного тумана». Данная система создается путем распыления смазочной жидкости во все стороны во время обработки и гарантирует непрерывное увлажнение и охлаждение инструмента, а также препятствует налипанию металлической стружки. Применение такой системы экологически ориентировано, расход жидкости составляет 10 г/мин водной и 0,1 г/мин масляной СОЖ, что позволяет исключить необходимость сбора, очистки и разложения СОЖ в отличие от рассмотренных ранее способов. Это значительно отражается на экономической составляющей производства, снижая себестоимость детали. По сравнению с обработкой всухую при подаче СОЖ с применением технологии минимальной смазки в 2 раза повышается стойкость инструмента, уменьшаются шероховатость получаемой поверхности и температурные деформации заготовок [5].

Принцип работы дозирующего устройства (рис. 1) заключается в подаче небольшой дозы смазывающего материала непосредственно в зону стружкообразования. Аэрозоль (воздушно-масляная смесь) образуется в процессе смешивания масла и сжатого воздуха по принципу Вентури. Система охлаждения масляным туманом содержит компрессор, нагнетающий масло под большим давлением. Тогда на выходе из распылителя форсунки (непосредственно над фрезой) образуется мелкодисперсная взвесь масла — тот самый «туман» (рис. 2).

В определенных ситуациях допускается фрезерование алюминия без применения СОЖ, так как её использование может привести к снижению периода стойкости фрезы из-за резких перепадов температуры. Сухую обработку можно выполнять при черновых операциях. Отсутствие смазки при черновой обработке увеличивает прочность режущей кромки фрезы, но не исключает температурных колебаний, оставляя их в допустимых пределах [5].

**Проведение эксперимента.** Эксперимент проводился на координатно-расточном станке 2431СФ10 (рис. 3) с модифицированным шпинделем с охлаждением, способным достигать частоты вращения до 20 000 об/мин.

Станок позволяет осуществлять обработку отверстий, чистовое фрезерование, нарезание резьбы метчиком и прочие работы в деталях, массой

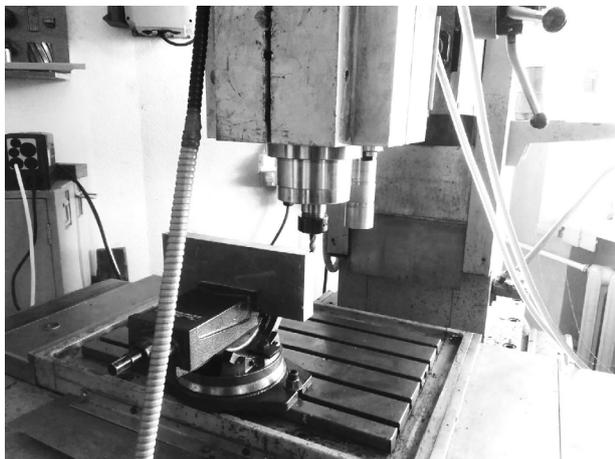


Рис. 3. Станок 2431СФ10 с модифицированным шпинделем



Рис. 4. Профилометр MarSurf PS1

Таблица 2

Технические характеристики координатно-расточного станка 2431СФ10

Наименование параметра	Значение параметра
Наименьшее и наибольшее расстояние от торца шпинделя до стола	50...575 мм
Вылет шпинделя	320 мм
Габариты рабочей поверхности стола	320 × 560 мм
Наибольшее продольное перемещение стола	400 мм
Наибольшее поперечное перемещение стола	250 мм
Наибольшее вертикальное перемещение шпиндельной бабки	400 мм
Максимальный момент на шпинделе	52 Н·м
Габаритные размеры станка	2360 × 1900 × 1580 мм
Масса станка	2500 кг

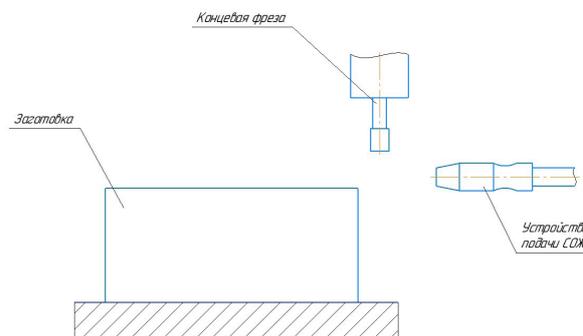


Рис. 5. Схема экспериментальной наладки

до 300 кг [7]. Основные технические характеристики станка представлены в табл. 2.

В качестве заготовки был выбран брусок из алюминиевого сплава Д16. Обработка производилась монолитной концевой фрезой Ø8 мм из быстрорежущей стали.

Применение фрезы из быстрорежущей стали обусловлено тем, что они обладают высокой ударной вязкостью и прочностью. Эти характеристики имеют особую значимость при обработке на станке с недостаточно жестким креплением заготовки [8]. В ходе эксперимента применяется четырехзаходная фреза. Она позволяет осуществлять более чистую обработку по сравнению с двухзаходными и трехзаходными фрезами, т.к. обладает высоким уровнем износостойкости [5].

Четырехзаходные фрезы применяются в обработке, когда объем получаемой стружки и подача малы и имеется необходимость получить низкое значение шероховатости. Также многозаходные фрезы применяются при обработке пазов, когда площадь контакта фрезы и обрабатываемой заго-

товки велика и необходима высокая жесткость инструмента.

Хорошее качество поверхности обеспечивается благодаря небольшой величине съема материала заготовки на зуб фрезы [9].

Измерение шероховатости обработанных поверхностей производилось компактным профилометром MarSurf PS1 по параметру Ra (рис. 4).

Максимальный диапазон измерения — 350 мкм (от –200 мкм до 150 мкм). Максимальная длина мера — 17,5 мм. Профилометр применяется для деталей типа вал, которые измеряются в осевом направлении, а также на плоских поверхностях любых деталей. Прибор имеет открытый щуп, конструкция которого устраняет влияние частиц грязи и масла на результат измерений. Прибор крепится на вертикальных ножках, что позволяет осуществлять вертикальное регулирование без каких-либо проблем. При осуществлении измерения имеется возможность переключаться между стандартами DIN (ISO), JIS, ANSI/ASME для выбора измеряемых длин отрезков [6].

Эксперимент заключался в фрезерной обработке алюминиевой заготовки с применением различных типов СОЖ в несколько этапов. Каждый опыт включает в себя изменение режимов резания для изучения качества получаемой поверхности. Эксперимент повторялся четыре раза без применения СОЖ и с применением различных типов СОЖ, подобранных ранее: смазка технологическая «СП-3» (полусинтетическая СОЖ), жидкость смазочно-охлаждающая «Смальта 4» (водно-эмульсионная СОЖ), смазочно-охлаждающая жидкость

Режимы резания для экспериментальной обработки алюминия

№ опыта	$n$ , об/мин	$S$ , мм/зуб	$V$ , м/мин
1	9000	0,02	283
2	9000	0,05	283
3	13000	0,02	408
4	13000	0,05	408

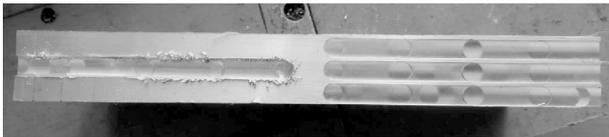


Рис. 6. Результаты эксперимента

«БИОСИЛ-С» (синтетическая СОЖ). Подача СОЖ в зону резания осуществлялась с помощью системы минимальной смазки. Схема экспериментальной наладки представлена на рис. 5.

Подбор режимов резания осуществлялся по каталогам KORLOY [10] и OSAWA [11]. Из рекомендаций по подбору режимов резания для обработки алюминия было принято решение определять зависимость качества поверхности от типа СОЖ, изменяя скорость вращения шпинделя ( $V$ , м/мин) и величину подачи ( $S$ , мм/зуб). Глубину резания  $t$  в ходе эксперимента не изменяли, установив фиксированное значение  $t=1$  мм. Выбранные величины скорости резания и подачи приведены в табл. 3.

Для осуществления обработки была написана следующая управляющая программа в системе ЧПУ станка:

N1 G54  
 N2 M0  
 N3 G91 G1 X-35. F720  
 N4 M0  
 N5 G91 G1 X-30. G1800  
 N6 M0  
 N7 G91 G1 X-30. F1040  
 N8 M0  
 N9 G91 G1 X-30. F2600  
 N10 Z5  
 N11 X125  
 N12 Z-5  
 N13 M2

На рис. 6 представлены результаты экспериментальной обработки. На детали отчетливо видны места расположения инструмента, обозначающие переход к следующему опыту путем изменения одного из параметров режимов резания. Визуально наблюдается чистота обработанных пазов, практически отсутствуют заусенцы на кромках заготовки. Наличие заусенцев на этих участках может быть обусловлено неровной поверхностью заготовки или неравномерной подачей СОЖ. Слева на заготовке расположен паз, обработанный без применения СОЖ. В этом эксперименте наблюдается большое количество заусенцев по краям паза, что объясняется тем, что материал заготовки наплавлялся

Среднее значение шероховатости обработанных пазов ( $R_a$ )

Типы СОЖ	СП-3	Смальта 4	БИОСИЛ-С	Без СОЖ
1-й опыт	1,544	1,710	1,151	1,994
2-й опыт	4,881	6,962	5,453	9,506
3-й опыт	2,402	1,748	1,439	2,003
4-й опыт	6,633	4,914	4,777	6,932

на инструмент из-за высокой температуры в зоне резания.

**Результаты эксперимента.** После проведения эксперимента качество полученной поверхности каждого обработанного паза измерялось при помощи профилометра. Измерения производились пять раз, после чего рассчитывалось среднее значение. Типы СОЖ и результаты измерений шероховатости ( $R_a$ , мкм) приведены в табл. 4.

Из результатов видно, что почти во всех обработанных участках применение синтетической СОЖ марки «БИОСИЛ-С» привело к получению наименьшей шероховатости поверхности. Применение при фрезеровании алюминия полусинтетической СОЖ марки «СП-3» и водной СОЖ марки «Смальта 4» позволяет достичь приблизительно одинаковых величин шероховатости.

При подаче  $S=0,02$  мм/зуб лучшее качество поверхности наблюдается на участках, обработанных с применением СОЖ марки «БИОСИЛ-С» ( $R_a = 1,151$  и  $R_a = 1,439$ ). СОЖ марки «СП-3» при  $V=283$  м/мин показывает неплохую шероховатость ( $R_a = 1,544$ ), но при увеличении скорости резания до  $V=408$  м/мин качество поверхности существенно ухудшается. СОЖ марки «Смальта 4» позволяет получить практически одинаковую шероховатость при разных скоростных режимах. Также анализ табл. 4 показал, что в результате обработки без применения СОЖ шероховатость поверхности получилась существенно выше, чем с применением СОЖ, либо сопоставима с шероховатостью, полученной с применением наихудшей марки СОЖ из испытанных для конкретного режима.

При обработке с подачей  $S = 0,05$  мм/зуб без СОЖ и с применением «Смальты 4» и «БИОСИЛ-С» значительно улучшается шероховатость с увеличением скорости резания до  $V=408$  м/мин. Применение СОЖ марки «СП-3», наоборот, привело к повышению шероховатости с ростом скорости резания.

**Выводы.** В результате исследований установлено, что СОЖ по-разному влияют на качество получаемой поверхности. Наилучшее качество поверхности было получено при скорости резания  $V=283$  м/мин и подаче  $S=0,02$  мм/зуб с применением СОЖ марки БИОСИЛ-С, что может быть обусловлено рациональными режимами резания и физическими свойствами СОЖ.

#### Библиографический список

- Ghavidel A. K., Seyedzavvar M., Shabgard M. Effect of molybdenum disulfide nanofluid application as coolant in milling process of Al8si3Cu aluminum alloy // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2018. Vol. 25 (5). P. 397 – 405.

2. Hamed M., Zedan Y., Samuel A. M. [et al.]. Effect of tool quality on the machinability characteristics of al-cu and al-si cast alloys // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. Vol. 106 (3-4). P. 1317–1326. DOI: 10.1007/s00170-019-04703-0.
3. Jebaraj M., Pradeep Kumar M. Effect of cryogenic CO<sub>2</sub> and LN<sub>2</sub> coolants in milling of aluminum alloy // Materials and Manufacturing Processes. 2019. Vol. 34 (5). P. 511–520. DOI: 10.1080/10426914.2018.1532591.
4. Karkalos N. E., Karmiris-Obratański P., Kurpiel S. [et al.]. Investigation on the surface quality obtained during trochoidal milling of 6082 aluminum alloy // Machines. 2021. Vol. 9 (4). DOI: 10.3390/machines9040075.
5. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / Под ред. С. Г. Энтелис, Э. М. Берлинер. Москва: Машиностроение, 1995. 496 с.
6. Прибор для измерения шероховатости поверхности MarSurf PS1. Операционное руководство. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/32255-12-marsurf-ps1-32345> (дата обращения: 25.03.22).
7. 2431СФ10 Станок координатно-расточный с УЦИ. URL: [http://stanki-katalog.ru/sprav\\_2431sf10.htm](http://stanki-katalog.ru/sprav_2431sf10.htm) (дата обращения: 03.03.2022).
8. Крутикова А. А., Митрофанов А. П. Экспериментальное исследование технологии подачи минимального количества смазки в охлажденном воздушном потоке при шлифовании жаропрочного сплава // Наука молодых — будущее России: сб. науч. ст. 3-й Междунар. научн. конф.: в 6 т. Курск: Университетская книга, 2018. Т. 6. С. 77–81.
9. Виды фрез — классификация по числу заходов. URL: <http://cncmotors.ru/articles/vidy-frez-klassifikaciya-frez-po-chisluzaxodov/> (дата обращения: 25.03.22).
10. Каталог KORLOY 2018 Металлорежущий инструмент и станочная оснастка. С. F80. URL: [http://www.korloy.com/en/ebook/2018-2019%20KORLOY\\_CUTTING\\_TOOL%20RU\\_re/assets/contents/download.pdf](http://www.korloy.com/en/ebook/2018-2019%20KORLOY_CUTTING_TOOL%20RU_re/assets/contents/download.pdf) (дата обращения: 03.04.2022).
11. Каталог OSAWA 2018 Инструмент режущий монолитный для сверления и фрезерования. С. 664. URL: <https://drive.google.com/file/d/1RRlwH81H6S34NqvKBjLsqiQxEfTujMh/view> (дата обращения: 03.04.2022).

---

**КИСЕЛЬ Антон Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.  
SPIN-код: 7105-3051  
AuthorID (РИНЦ): 702552  
ORCID: 0000-0002-8014-0550  
AuthorID (SCOPUS): 57211275687  
ResearcherID: B-9210-2019  
Адрес для переписки: kisel1988@mail.ru

**МАКАШИН Дмитрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ, г. Омск.  
SPIN-код: 1763-1883  
AuthorID (РИНЦ): 926848  
AuthorID (SCOPUS): 57203642272  
Адрес для переписки: dima.makashin@gmail.com

#### Для цитирования

Кисель А. Г., Макашин Д. С. Влияние СОЖ и режимов обработки на шероховатость поверхности при торцевом фрезеровании заготовок из алюминиевых сплавов // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 32–36. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-32-36.

Статья поступила в редакцию 12.03.2022 г.

© А. Г. Кисель, Д. С. Макашин