

## Исследование влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на точность и качество обрабатываемых отверстий в авиационных материалах

Ю.Н. Иванов<sup>a</sup>, К.С. Кланцова<sup>b</sup>, Н.С. Чашин<sup>c</sup>, А.С. Пятых<sup>d</sup>, Г.В. Матлыгин<sup>e</sup>, А.С. Исаченко<sup>f</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>a</sup> iv\_yuriy@ex.istu.edu, <sup>b</sup> K\_Klantsova@sj.yakovlev.ru, <sup>c</sup> chash.nik@ex.istu.edu, <sup>d</sup> pyatykhas@ex.istu.edu,

<sup>e</sup> matlygingv@ex.istu.edu, <sup>f</sup> isachenkoas@ex.istu.edu

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8887-3038>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0002-6040-7606>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6623-338X>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>,

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5484-6250>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9522-3714>

Статья поступила 14.07.2025, принята 08.09.2025

*Авиационная промышленность сталкивается с проблемой увеличения производительности операции сверления отверстий в условиях агрегатно-сборочного производства ввиду повышенных требований к диаметральной точности и шероховатости отверстий, ограниченных возможностях подвода инструмента, требований к чистоте процесса, исключающих подачу смазочно-охлаждающей жидкости под давлением, и большого количества обрабатываемых отверстий. Исследование направлено на анализ влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на диаметральную точность, шероховатость поверхности и температуру при сверлении авиационных материалов с использованием минимального количества смазочного материала. Эксперименты проводились на сверлильной машине с автоматической подачей Atlas Copco PFD-1500 с использованием твёрдосплавного спирального сверла в качестве режущего инструмента с направлением его через накладной кондуктор без предварительной зацентровки. Применялись смазочно-охлаждающие технологические средства Accu-lube LB 5000, Tech-lube 2000 и Tech-lube 5000 с использованием станции для их подготовки. В качестве исследуемых материалов использовались сталь 30ХГСА, алюминиевый сплав 1933 и титановый сплав ВТ6. Был проведён однофакторный дисперсионный анализ результатов экспериментов в среде Statistica. Результаты исследования показали, что вид смазочно-охлаждающего технологического средства слабо влияет на температуру в зоне резания (наибольшее влияние для титанового сплава ВТ6), однако значительно воздействует на шероховатость и диаметральную точность. Для конструкционной стали 30ХГСА оптимальна Accu-lube LB 5000, для высокопрочного алюминиевого сплава 1933 Tech-lube 2000, для ВТ6 Tech-lube 5000/Accu-lube LB 5000. Результаты подтверждают целесообразность адаптивного подбора смазочно-охлаждающего технологического средства под конкретные материалы для повышения точности и снижения брака в авиастроении, а также предоставляют возможность моделирования выходных параметров отверстия при сверлении отверстий в первом слое смешанного пакета, которые будут играть роль направляющей для последующих слоёв.*

**Ключевые слова:** сверлильная машина с автоматической подачей; смазочно-охлаждающие технологические средства; диаметральная точность; температура; шероховатость поверхности.

## A study of the influence of lubricating and cooling technological means on the accuracy and quality of processed holes in aviation materials

Yu.N. Ivanov<sup>a</sup>, K.S. Klantsova<sup>b</sup>, N.S. Chashchin<sup>a</sup>, A.S. Pyatykh<sup>d</sup>, G.V. Matlygin<sup>d</sup>, A.S. Isachenko<sup>d</sup>

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup> iv\_yuriy@ex.istu.edu, <sup>b</sup> K\_Klantsova@sj.yakovlev.ru, <sup>c</sup> chash.nik@ex.istu.edu, <sup>d</sup> pyatykhas@ex.istu.edu,

<sup>e</sup> matlygingv@ex.istu.edu, <sup>f</sup> isachenkoas@ex.istu.edu

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8887-3038>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0002-6040-7606>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6623-338X>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>,

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5484-6250>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9522-3714>

Received 14.07.2025, accepted 08.09.2025

*The aviation industry is facing the challenge of increasing drilling operation productivity in assembly production due to heightened requirements for diameter accuracy and surface roughness of holes, limited tool access, cleanliness process demands that exclude the use of pressurized cutting fluid, and the large number of holes being processed. This study aims to analyze the effect of various cutting fluids on diameter accuracy, surface roughness, and temperature while drilling aviation materials using minimal amounts of lubricant. Experiments are conducted on an Atlas Copco PFD-1500 drilling machine with automatic feed, using a twist drill as the cutting tool directed through an overlay jig without prior centering. Cutting fluids Accu-lube LB 5000, Tech-lube 2000, and Tech-lube 5000 are applied. The materials used include steel 30KhGSA, aluminum alloy 1933, and titanium alloy VT6. A one-factor analysis of variance is performed on the experimental results using Statistica environment. The study results indicate that the type of cutting fluid has a weak effect on the temperature in the cutting zone (with the greatest impact observed for VT6) but significantly influences surface roughness and diameter accuracy. For structural steel 30KhGSA, Accu-lube LB 5000 is optimal; for high-strength aluminum alloy 1933, Tech-*

*lube 2000; and for VT6, either Tech-lube 5000 or Accu-lube LB 5000 is suitable. The results confirm the feasibility of adaptively selecting the cutting fluid for specific materials to enhance accuracy and reduce defects in aircraft manufacturing, as well as provide the potential for modeling the output parameters of holes drilled in the first layer of a mixed stack, which will guide subsequent layers.*

**Keywords:** automatic feed drilling machine; cutting fluids; diameter accuracy; temperature; surface roughness.

**Введение.** Современное машиностроение характеризуется тенденцией к повышению производительности механической обработки, а также высокими требованиями к размерной точности и качеству обрабатываемых поверхностей. В авиастроительной отрасли одной из трудоёмких операций является сверление отверстий из-за высоких требований к диаметральной точности и качеству поверхности, а также количеству необходимых отверстий под заклёпки и болты, исчисляемых сотнями на одну сборочную единицу самолета [1]. Отверстия под заклёпки и другие крепёжные изделия в авиационных деталях являются ответственными элементами, так как под воздействием циклических нагрузок в процессе эксплуатации отверстия являются очагами зарождения усталостных трещин. Применение композиционных материалов в современных летательных аппаратах позволяет сократить количество крепёжных отверстий, но в настоящее время авиационные металлические конструкции всё ещё широко применяются, поэтому проблема увеличения производительности сверления отверстий в сталях, алюминиевых и титановых сплавах, повышение их точности и качества остается актуальной.

Сверление отверстий в авиационных деталях характеризуется сложными условиями, так как многие из сборочных отверстий необходимо сверлить в агрегатно-сборочных цехах в процессе сборки, что делает невозможным применение станков [2]. В случае ненадлежащего качества отверстия, обработанного в составе сборочной единицы, возможно бракование собираемых деталей или узлов, что отрицательно сказывается на стоимости производства. Дополнительное удорожание возникает из-за необходимости изготовления специальных болтов для компенсации дефектов отверстий, что также приводит к увеличению времени на изготовление изделия [1]. Повышенные требования к чистоте процесса не позволяют использовать смазочно-охлаждающие жидкости, подающиеся под давлением, что затрудняет отвод стружки и регулирование температурного режима в зоне резания, особенно для глубоких отверстий [3–5]. Одним из компромиссных решений является сверление отверстий при помощи сверлильных машин с автоматической подачей (СМАП) или ручных сверлильных машин с применением технологий орбитального сверления [2] и смазывания минимальным количеством смазочного материала (MQL – minimum quantity lubrication) [6].

Применение технологии смазывания минимальным количеством смазочного материала оказывает такой же эффект, что и традиционные методы с применением смазочно-охлаждающих жидкостей, но отличаются повышенной экономичностью, экологичностью и чистотой [7–10].

Основными факторами, влияющими на шероховатость отверстия при сверлении, являются геометрические характеристики режущего инструмента, режимы

резания, использование и вид СОТС, жёсткость технологической системы, а также вибрации, возникающие в процессе резания [11].

Процесс сверления требует применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) для обеспечения качества обрабатываемого отверстия за счёт снижения сил трения. Вид и свойства смазочно-охлаждающего технологического состава влияют на размерную точность, шероховатость, и другие параметры отверстия при сверлении [10, 12–18]. Немаловажным является и положительный эффект, оказываемый смазочно-охлаждающей жидкостью, на стойкость инструмента, что наиболее актуально при необходимости сверления большого количества отверстий [8, 19–20].

**Цель работы** – исследование влияния выбора СОТС на параметры диаметральной точности и качества обработки отверстий с использованием СМАП в авиационных материалах, включая шероховатость поверхности, температурный режим в зоне резания, для определения оптимальных условий механической обработки с учётом свойств исследуемых материалов.

**Материалы и метод исследования.** Эксперимент проводился с использованием сверлильной машины с автоматической подачей (СМАП) Atlas Copco PFD-1500 (рис. 1).



**Рис. 1.** Сверлильная машина с автоматической подачей Atlas Copco PFD-1500

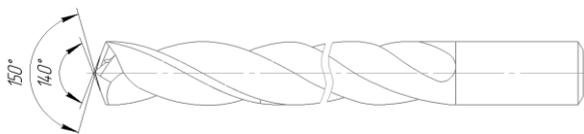
Технические характеристики сверлильной машины с автоматической подачей PFD-1500 указаны в табл. 1.

В качестве исследуемых образцов были выбраны три марки материала: конструкционная среднелегированная сталь 30ХГСА, высокопрочный алюминиевый сплав 1933 и титановый сплав VT6. Исследуемые образцы имели твёрдость, соответствующую требованиям нормативных документов на указанные материалы.

**Таблица 1.** Технические характеристики СМАП Atlas Copco PFD-1500

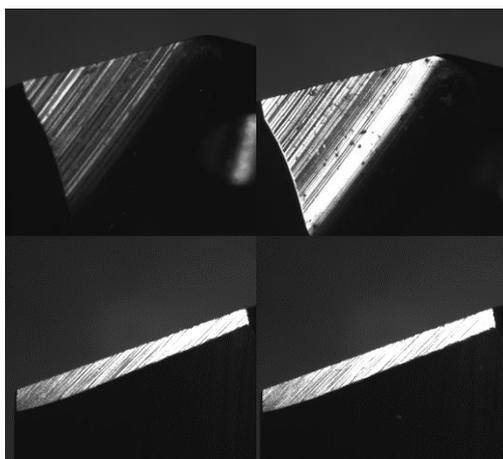
Характеристика	Единица измерения	Значение
Мощность (механическая) на шпинделе	Вт	1500
Диапазон устанавливаемых частот вращения	об/мин	100–1200
Диапазон устанавливаемых подач	мм/об	0,023–0,33
Амплитуда микровибраций (с блоком MITIS)	мм	0,15
Частота микровибраций (с блоком MITIS)	1/об	2,5

В качестве режущего инструмента было использовано спиральное сверло HAM PRÄZISION 271 Nirodrill с покрытием карбонитрид титана (TiCN) (рис. 2).



**Рис. 2.** Общий вид спирального сверла HAM PRÄZISION 271 Nirodrill

Сверло из твёрдого сплава диаметром 12 мм с внутренними каналами для подвода смазочно-охлаждающих технологических средств в зону резания, угол при вершине с двойной подточкой 150°/140°, угол спирали 30°. Состояние режущих кромок спирального сверла до проведения эксперимента приведено на рис. 3. На передней поверхности инструмента выражены небольшие дефекты, обусловленные качеством обработки при изготовлении режущего инструмента.



**Рис. 3.** Состояние режущих кромок нового инструмента

Для охлаждения инструмента в процессе сверления использовались СОТС: Accu-lube LB 5000, Tech-lube 2000, Tech-lube 5000. Масло для микросмазывания подаётся непосредственно на режущую кромку используемого инструмента и не требует смывания. Данные СОТС используются для механической обработки металлических элементов с умеренной и повышенной нагрузкой.

Основные области применения:

1) Accu-lube LB 5000 используется для механической обработки при умеренных нагрузках, в первую очередь, цветных металлов, в особенности алюминия;

2) Tech-lube 2000 – является универсальным средством для микросмазывания при обработке чёрных и цветных металлов, в том числе титановых сплавов при повышенной нагрузке;

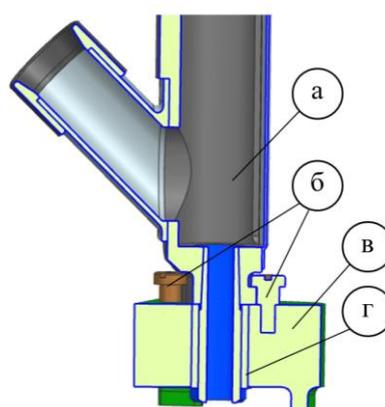
3) Tech-lube 5000 – является аналогом Accu-lube LB 5000, и также используется при обработке преимущественно цветных сплавов при умеренной нагрузке.

Рациональное использование данных СОТС подразумевает использование станции для их подготовки (рис. 4). Станция подготовки СОТС включает в себя ёмкости для хранения СОТС и смазочного материала, предназначенного для двигателя СМАП. На выходе из ёмкостей установлены распределительные устройства, которые обеспечивают регулирование расхода СОТС. Полученная смесь, прошедшая аэрацию под давлением, поступает в СМАП [16]. Расход в ходе проведенного эксперимента был постоянным и составлял 1,5 г/мин.



**Рис. 4.** Станция подготовки СОТС

В сверлильной машине, используемой в данном исследовании, реализован байонетный механизм закрепления в кондукторе типа Twist Lock (рис. 5).



**Рис. 5.** Байонетный механизм закрепления типа Twist Lock: а – носовик; б – болты; в – кондуктор; г – кондукторная втулка; д – обрабатываемая деталь

Отличительными особенностями байонетного механизма являются: обеспечение безлюфтовой передачи осевых нагрузок и крутящих моментов в разных направлениях и различной последовательности, а также исключение произвольного саморасцепления в момент углового смещения втулки, что минимизирует риск разбивки отверстия и поломки режущего инструмента. Указанный тип крепления наиболее целесообразен для сверления отверстий диаметром более 8 мм.

Установка СМАП на исследуемых образцах производилась с использованием накладного кондуктора (рис. 6).

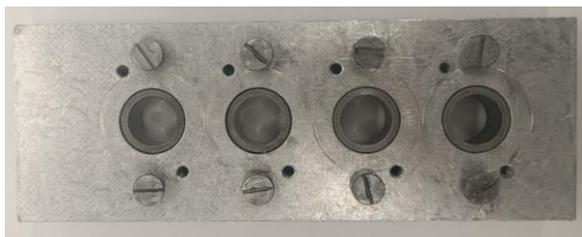


Рис. 6. Кондуктор для СМАП

Для исследования шероховатости поверхности использовался прибор Taylor Hobson Form Talysurf i200, предназначенный для измерения формы, размеров и текстуры поверхности (рис. 7).

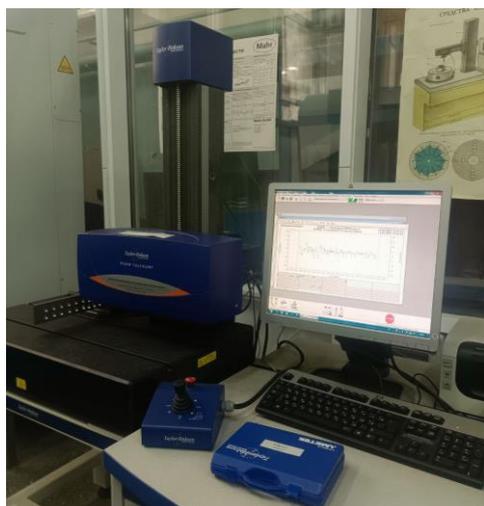


Рис. 7. Профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200

Для измерения точности диаметральных размеров отверстий, полученных после сверления, был использован трёхточечный нутромер фирмы Mitutoyo модель нутромера 468-971 (рис. 8).



Рис. 8. Нутромер цифровой Mitutoyo серии 468-971

Измерение температуры в зоне резания производится с помощью тепловизионной камеры, модели Flir Orion серии SC7000M (рис. 9), способной получать видео изучаемого объекта в нескольких областях инфракрасного спектра с минимальными искажениями изображения [21].



Рис. 9. Тепловизионная камера Flir Orion

Для измерения и контроля износа спирального сверла HAM PRAZISION 271 Nirodrill использовалось контрольно-измерительное оборудование Zoller Genius III. Установка Zoller Genius III для контроля режущих инструментов – это универсальная измерительная машина для режущего инструмента, предназначенная как для быстрой проверки отдельных геометрических параметров, так и полностью автоматического контроля. Система проводит бесконтактное инспектирование режущих инструментов в отражённом свете и может передавать результаты измерений на заточные станки и другие системы. Установка Zoller Genius III для контроля режущих инструментов приведена на рис. 10.



Рис. 10. Установка Zoller Genius III для контроля режущих инструментов

Технические характеристики установки Zoller Genius III для контроля режущих инструментов указаны в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики установки Zoller Genius III для контроля режущих инструментов

Характеристика	Единица измерения	Значение
Диапазоны измерений:		
Ось Z	мм	600
Ось X	мм	175
Ось Y	мм	100
Диаметр	мм	340

Методика исследования заключалась в последовательной обработке отверстий в каждом исследуемом материале на фиксированных режимах резания. Для проведения исследования инструментом диаметром 12 мм выбраны следующие режимы резания:

- скорость резания 10,2 м/мин;
- подача 0,023 мм/об.

В исследовании определяется зависимость шероховатости поверхности  $Ra$ , мкм, точности диаметрального размера отверстия  $D$ , мм и температуры задней стенки обрабатываемого образца  $T$ , °С, в зависимости от обрабатываемого материала и применяемой СОТС для его обработки.

Для обработки статистических данных и построения результирующих графиков использовалось программное обеспечение MS Excel и Statistica.

В качестве плана эксперимента определено сочетание материалов образцов и используемых видов СОТС. Для снижения случайных ошибок и повышения достоверности полученных результатов для каждого сочетания материалов образцов и используемых видов СОТС проведено 9 групп опытов с тремя повторениями, суммарное количество опытов составило 27. Сочетание материала и СОТС принимается в качестве фактора.

По результатам наблюдений рассчитаны средние значения каждой группы выходного параметра. Средние результаты измерений содержатся в табл. 3.

Таблица 3. Средние результаты измерений

№ группы	Сочетание	Результат средних значений		
		$T$ , °С,	$Ra$ , мкм	$D$ , мм
1	30ХГСА AL5000	114,7	0,39	12,005
2	30ХГСА TL2000	105,1	0,98	12,008
3	30ХГСА TL5000	108,5	1,08	12,011
4	1933 AL5000	31,0	0,35	12,030
5	1933 TL2000	38,5	0,19	12,007
6	1933 TL5000	38,7	0,47	12,015
7	BT6 AL5000	110,5	0,61	12,008
8	BT6 TL2000	130,8	0,67	12,014
9	BT6 TL5000	132,6	0,59	12,007

Для определения статистически значимых различий в средних значениях температуры задней стенки обрабатываемого образца, шероховатости и диаметральной точности отверстий между группами был проведён однофакторный дисперсионный анализ в программном обеспечении MS Excel и Statistica. Анализ проводился отдельно для каждого из указанных параметров.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа приведены в табл. 4–6, в которых отражены ключевые компоненты дисперсии:

- 1)  $SS$  – сумма квадратов отклонений, отражающая вариативность данных;
- 2)  $df$  – степени свободы, определяющие «гибкость» данных в расчётах;
- 3)  $MS$  – средний квадрат, вычисляемый как отношение  $SS$  к  $df$ ;
- 4)  $F$  – критерий Фишера;
- 5)  $p$  – уровень значимости.
- 6)  $F_{крит}$  – критическое значение критерия Фишера.

Таблица 4. Результаты однофакторного дисперсионного анализа для  $T$ , °С

Источник вариации	$SS$	$df$	$MS$	$F$	$p$	$F_{крит}$
Между группами	42553,19	8	5319,148	531,91	9,07903E <sup>-20</sup>	2,51
Внутри групп	180	18	10			
Итого	42733,19	26				

Результаты однофакторного дисперсионного анализа температуры задней стенки образца свидетельствуют о статистически значимых различиях между группами. Значение  $F$ -критерия существенно превышает критическое, что указывает на заметные различия в средних значениях, вероятно, обусловленные влиянием выбора СОТС на температуру для данного материала.

Таблица 5. Результаты однофакторного дисперсионного анализа для  $Ra$ , мкм

Источник вариации	$SS$	$df$	$MS$	$F$	$p$	$F_{крит}$
Между группами	1,049867	8	0,131233	2,45296	0,0542	2,51
Внутри групп	0,963	18	0,053			
Итого	2,012	26				

Анализ шероховатости показывает отсутствие статистически значимых различий между группами, значение  $F$ -критерия ниже критического, а  $p$ -значение превышает стандартный уровень значимости.

Таблица 6. Результаты однофакторного дисперсионного анализа для  $D$ , мм

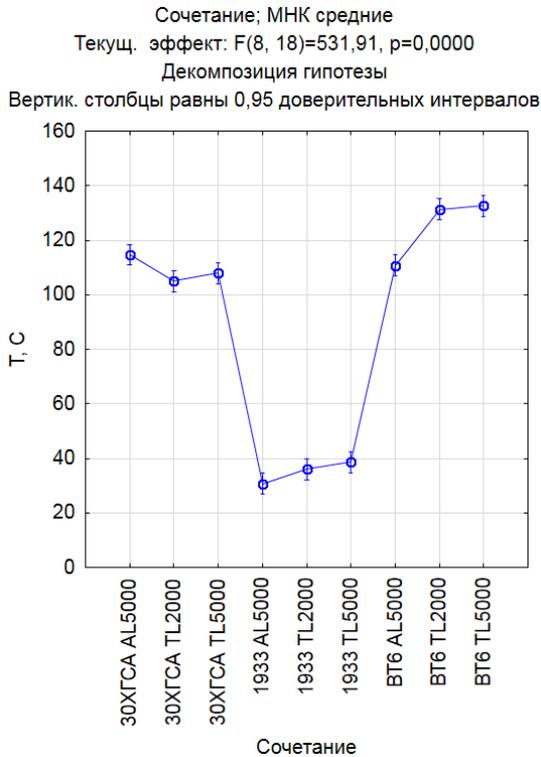
Источник вариации	$SS$	$df$	$MS$	$F$	$p$	$F_{крит}$
Между группами	453,3333	8	56,66667	0,987734	0,4769	2,51
Внутри групп	1032,667	18	57,37037			
Итого	1486	26				

Для диаметральной точности отверстий анализ также не выявил статистически значимых различий: значение  $F$ -критерия меньше критического, а  $p$ -значение выше стандартного уровня значимости.

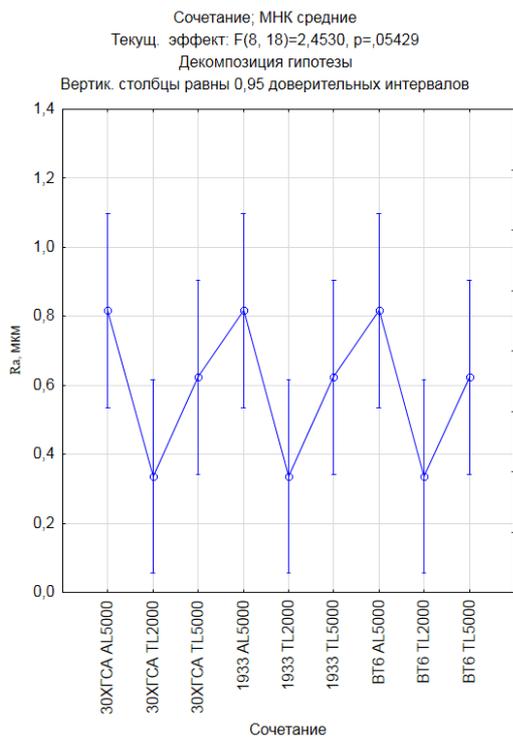
**Результаты исследований и их обсуждение.** Рис. 11–13 представляют собой результирующие графики однофакторного дисперсионного анализа, полученные в результате экспериментальных исследований.

Из рис. 9 видно, что СОТС Accu-lube 5000 обеспечивает более низкую температуру металла во время обработки по сравнению с Techlube 2000 и Techlube 5000 для алюминиевого сплава 1933 и титанового сплава BT6. Для стали 30ХГСА напротив наблюдается наиболее высокое значение температуры. Тем не менее, амплитуда температур не слишком велика для 30ХГСА – она составляет 6,2 °С, для сплава 1933 она составляет 7,6 °С, и для сплава BT6 она составляет 22,5 °С. Из этого можно сделать вывод, что вид СОТС оказывает наибольшее влияние на температуру при обработке титанового сплава BT6 и наименьшее влияние при обработке алю-

миниевого сплава 1933. Слабое влияние вида СОТС на температуру обрабатываемого материала может быть объяснено тем, что в условиях применения технологии смазывания минимальным количеством смазочного материала СОТС снижает температуру в основном за счёт снижения сил трения при резании.



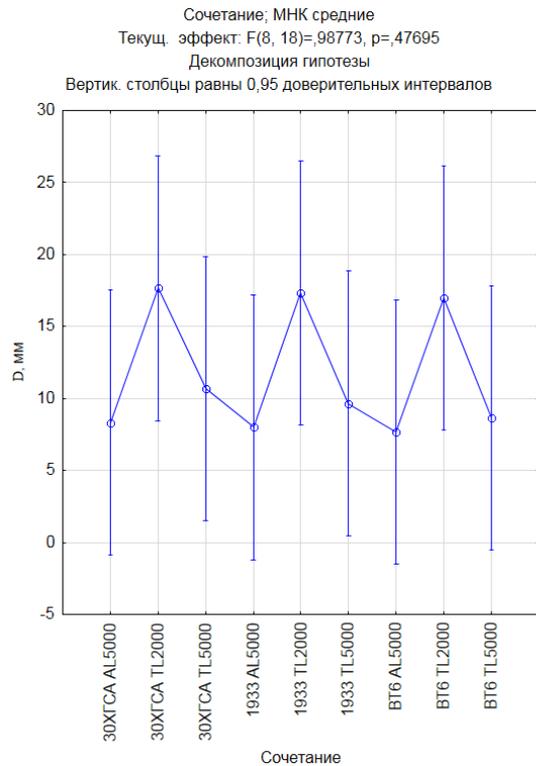
**Рис. 11.** Результирующий график однофакторного регрессионного анализа температур задней стенки обрабатываемого образца



**Рис. 12.** Результирующий график однофакторного регрессионного анализа шероховатости поверхности отверстия

Из рис. 10 видно, что вид СОТС оказывает достаточно значительное влияние на шероховатость обрабатываемой поверхности, однако универсальной закономерности, применимой ко всем трём материалам, не прослеживается. При обработке стали 30XГСА наилучшее значение параметра шероховатости обеспечивается применением СОТС Accu-lube 5000, при обработке сплава 1933 – Techlube 2000, при обработке сплава BT6 – Techlube 5000 или Accu-lube 5000, дающие практически идентичные результаты. Может быть сделан вывод о том, что вид СОТС в большей степени влияет на шероховатость при обработке стали 30XГСА (размах вариации значений 0,69 мкм), а при обработке сплавов 1933 и BT6 эффект менее заметен с размахом вариации значений 0,08 мкм и 0,38 мкм, соответственно.

Из рис. 11 видно, что наибольшее влияние вид СОТС оказывает на точность диаметрального размера при сверлении отверстий в сплаве 1933 с размахом вариации значений 23 мкм. СОТС Techlube 2000 обеспечивает наилучшие показатели точности диаметрального размера. Для стали 30XГСА и сплава BT6 размах вариации значений диаметральных размеров составляет 6 мкм и 7 мкм соответственно. Для стали 30XГСА наиболее точное значение диаметрального размера обеспечивает применение СОТС Accu-lube 5000, в то время как для BT6 СОТС Accu-lube 5000 и Techlube 5000 дают почти идентичные результаты.



**Рис. 13.** Результирующий график однофакторного регрессионного анализа точности диаметрального размера

После проведенного эксперимента на спиральном сверле HAM PRÄZISION 271 Nirodrill зафиксирован равномерный износ режущих кромок по задней поверхности, наблюдаемые значения износа не превышают допустимых значений (рис. 14).

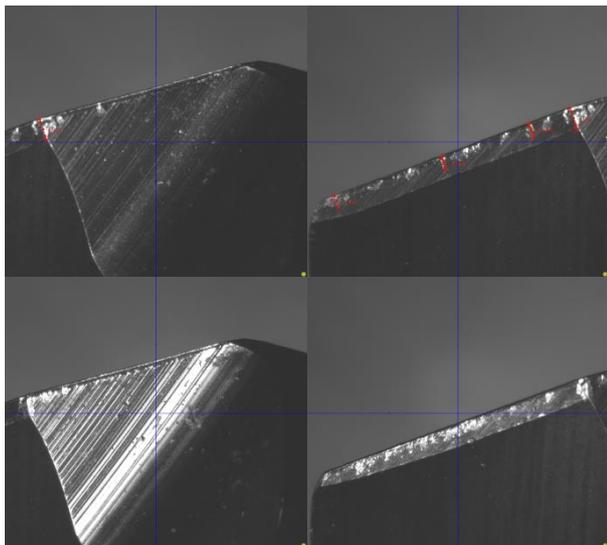


Рис. 14. Состояние режущих кромок инструмента после проведения эксперимента

Наблюдаемый характер износа режущей кромки соответствует типичным признакам нормального абразивного износа, возникающего при длительном взаимодействии с обрабатываемым материалом на рекомендуемых режимах резания.

#### Литература

- Белан Д.Ю., Макашин Д.С. Повышение производительности при сверлении отверстий алюминиевых сплавов для аэрокосмических деталей // Проблемы и перспективы развития России: сборник науч. стат. 5-й Всеросс. науч. конф. : в 4 т. – Том 4. – Курск. – 2022. – С. 171–174. EDN: SSQVOU
- Чашин Н.С. Обработка отверстий в смешанных пакетах методом орбитального сверления / Н.С. Чашин, Ю.Н. Иванов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 11(106). – С. 44–49. EDN: VAUELX
- Ivanov Yu.N., Chashchin N.S., Pashkov A.A. A study of cryogenic cooling when reaming holes in CFRP/Ti/Al stacks // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). – 2022. – Vol. 2. – PP. 650–656. doi:10.1007/978-3-030-85230-6\_77. EDN: CHYTQA
- Чашин Н.С. Исследование технологии обработки отверстий малых диаметров в полимерном композиционном материале на робототехническом комплексе // Вестник ИрГТУ. – 2017. – Т. 21. – № 6(125). – С. 39–48. EDN: YTNPNP
- Иванов Ю.Н., Чапышев А.П., Каверзин Е.Я. Экспериментальное исследование влияния теплового расширения обрабатываемых материалов при сухом сверлении отверстий в пакетах структуры «полимерный композиционный материал – титановый сплав» // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 10(81). – С. 36–42. EDN: RGSXJV
- Свинин В.М., Шутенков А.В., Пономарев Б.Б. Определение основных технических параметров проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28. – № 2. – С. 224–237. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-224-237. EDN: DQWDDT
- Sultan A.Z. Minimum quantity of lubricant drilling of stainless steel using refined palm olein: Effect of coating tool on surface roughness and tool wear // Procedia Manufacturing 30. 2019. PP. 427–434.
- Boubekri N., Shaikh V., Foster P.R. A technology enabler for green machining: minimum quantity lubrication (MQL) // Journal of Manufacturing Technology Management. – 2010. – Vol. 21. – № 5. – PP. 556–566. http://dx.doi.org/10.1108/17410381011046968.
- Natesh C.P. Soft computing for sustainable drilling of AISI 316L stainless steel under formulated neem oil minimum quantity lubrication condition // Cogent Engineering. – 2023. 10:2, 2261231, doi: 10.1080/23311916.2023.2261231
- Jersák J., Simon S. Influence of cooling lubricants on the surface roughness and energy efficiency of the cutting machine tools // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. – 2017. – Vol. 22, № 3. – PP. 779–787. DOI: 10.1515/ijame-2017-0050.
- Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 12(83). EDN: RTSACX
- Tai B., Jessop A., Stephenson D., Shih A., 2012, Workpiece Thermal Distortion in Minimum Quantity Lubrication Deep Hole Drilling – Finite Element Modeling and Experimental Validation // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2012. – 134/1: 1–9. https://doi.org/10.1115/1.4005432.
- Михайленко С.В. Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на шероховатость отверстий при сверлении заготовок из низколегированных сталей / С.В. Михайленко, А.Г. Кисель // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 12. – С. 18–25. doi: 10.30987/2782-5957-2022-12-18-25. EDN: VKGGJN
- Чашин Н.С. Исследование влияния методов охлаждения и состава смешанного пакета на параметры отверстия в алюминиевом сплаве / Н.С. Чашин, Ю.Н. Иванов // Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2021): Мат-лы XIV Всеросс. конф. с международным участием,

- Москва, 25 октября – 20 ноября 2021 года. – М. : Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 2021. – С. 348–354. EDN: SHQEPY
15. Гайфуллин И.И. Выбор смазочно-охлаждающих технологических средств на основе их функциональных действий при лезвийной обработке конструкционных материалов / И.И. Гайфуллин, А.К. Кириллов // *Машиностроение: традиции и инновации (МТИ - 2021): Мат-лы XIV Всерос. конф. с международным участием, Москва, 25 октября – 20 ноября 2021 года.* – М. : Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 2021. – С. 123–129. EDN: GXSEBM
  16. Şirin E., Şirin S. Investigation of the Performance of Ecological Cooling/Lubrication Methods in the Milling of AISI 316L Stainless Steel // *Manuf. Technol. – Appl.* 2021. – Vol. 2. № 1. PP. 75–84.
  17. Kamdani K. Study of Cutting Force and Surface Roughness on Drilling Stainless Steel 316L Under Various Coolant Condition // *Key Engineering Materials.* – 2018. – Vol. 791. – PP. 116–122. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.791.116.
  18. Муслина Г.Р., Правиков Ю.М. Измерение и контроль геометрических параметров деталей машин и приборов : учеб. пособие. – 2-е изд. – Ульяновск : УлГТУ, 2022. 1.0.0
  19. Davim J.P., Sreejith P.S., Silva J. Turning of Brasses Using Minimum Quantity of Lubricant (MQL) and Flooded Lubricant Conditions // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2007. Vol. 22:1. – PP. 45–50.
  20. Sultan A. Z., Sharif S., Kurniawan D. Drilling of AISI 316L stainless steel: Effect of coolant condition on surface roughness and tool wear // *AIP Conference Proceedings* 2217, 020004. – 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0000548>.
  21. Димов Ю. В., Подашев Д. Б. Температура в зоне резания при обработке эластичными абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // *Вестник ИрГТУ.* – 2015. – 2(97). – С. 38–42. EDN: TKOKTR
  - surface roughness and tool wear // *Procedia Manufacturing* 30. – 2019. – PP. 427–434.
  8. Boubekri N., Shaikh V., Foster P.R. A technology enabler for green machining: minimum quantity lubrication (MQL) // *Journal of Manufacturing Technology Management.* – 2010. Vol. 21. – № 5. – PP. 556–566. <http://dx.doi.org/10.1108/17410381011046968>.
  9. Natesh C.P. Soft computing for sustainable drilling of AISI 316L stainless steel under formulated neem oil minimum quantity lubrication condition // *Cogent Engineering.* – 2023. – 10:2, 2261231, doi: 10.1080/23311916.2023.2261231
  10. Jersák J., Simon S. Influence of cooling lubricants on the surface roughness and energy efficiency of the cutting machine tools // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering.* – 2017. – Vol. 22, № 3. – PP. 779–787. DOI: 10.1515/ijame-2017-0050.
  11. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Influence of vibrations on accuracy and surface quality of holes during drilling // *IrGTU Bulletin.* – 2013. – № 12(83). – EDN: RTSACX
  12. Tai B., Jessop A., Stephenson D., Shih, A., 2012, Workpiece Thermal Distortion in Minimum Quantity Lubrication Deep Hole Drilling – Finite Element Modeling and Experimental Validation // *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* – 2012. 134/1: 1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4005432>.
  13. Mikhailenko S.V. Influence of cutting fluids on hole roughness during drilling of low-alloy steel workpieces / S.V. Mikhailenko, A.G. Kisel // *Transport Engineering.* – 2022. – № 12. – pp. 18–25. doi: 10.30987/2782-5957-2022-12-18-25. EDN: VKGGJN
  14. Chashchin N.S. Research of cooling methods and mixed stack composition influence on hole parameters in aluminum alloy / N.S. Chashchin, Yu.N. Ivanov // *Mechanical Engineering: Traditions and Innovations (MTI-2021): Proceedings of the XIV All-Russian Conference with International Participation, Moscow, October 25 – November 20, 2021.* – Moscow : Moscow State Technological University "STANKIN". – 2021. – pp. 348–354. EDN: SHQEPY
  15. Gayfullin I.I. Selection of cutting fluids based on their functional actions during blade machining of structural materials / I.I. Gayfullin, A.K. Kirillov // *Mechanical Engineering: Traditions and Innovations (MTI-2021): Proceedings of the XIV All-Russian Conference with International Participation, Moscow, October 25 – November 20, 2021.* – Moscow : Moscow State Technological University «STANKIN», 2021. – pp. 123–129. EDN: GXSEBM
  16. Şirin E., Şirin S. Investigation of the Performance of Ecological Cooling/Lubrication Methods in the Milling of AISI 316L Stainless Steel // *Manuf. Technol. Appl.* 2021. – Vol. 2. – № 1. – PP. 75–84.
  17. Kamdani, K. Study of Cutting Force and Surface Roughness on Drilling Stainless Steel 316L Under Various Coolant Condition // *Key Engineering Materials.* – 2018. – Vol. 791. – PP. 116–122. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.791.116.
  18. Muslima G.R., Pravikov Yu.M. Measurement and Control of Geometric Parameters of Machine Parts and Devices: Textbook. – 2nd ed. – Ulyanovsk : UISTU, 2022. 1.0.0
  19. Davim J.P., Sreejith P.S., Silva J. Turning of Brasses Using Minimum Quantity of Lubricant (MQL) and Flooded Lubricant Conditions // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2007. – Vol. 22:1. – PP. 45–50.
  20. Sultan A.Z., Sharif S., Kurniawan D. Drilling of AISI 316L stainless steel: Effect of coolant condition on surface roughness and tool wear // *AIP Conference Proceedings* 2217, 020004. – 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0000548>.
  21. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Temperature in the cutting zone during processing with elastic abrasive wheels / Yu.V. Dimov, D.B. Podashev // *IrGTU Bulletin.* – 2015. – 2(97). – pp. 38–42. EDN: TKOKT

#### References

1. Belan D.Yu., Makashin D.S. Increasing productivity when drilling aluminum alloy holes for aerospace parts // *Problems and Prospects for Russia's Development: Collection of Scientific Articles of the 5th All-Russian Scientific Conference: in 4 volumes.* – Vol. 4. – Kursk. – 2022. – PP. 171–174. EDN: SSQVOU
2. Chashchin N.S. Hole machining in mixed stacks using orbital drilling / N.S. Chashchin, Yu.N. Ivanov // *Bulletin of Irkutsk State Technical University.* – 2015. – № 11(106). – PP. 44–49. EDN: VAUELX
3. Ivanov Yu.N., Chashchin N.S., Pashkov A.A. A study of cryogenic cooling when reaming holes in CFRP/Ti/Al stacks // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021).* – 2022. – Vol. 2. – PP. 650–656. doi:10.1007/978-3-030-85230-6\_77. EDN: CHYTQA
4. Chashchin N.S. Research of hole machining technology for small diameters in polymer composite material using robotic complex // *IrGTU Bulletin.* – 2017. – Vol. 21. – № 6(125). – PP. 39–48. EDN: YTNPNP
5. Ivanov Yu.N., Chapychev A.P., Kaverzin E.Ya. Experimental study of thermal expansion influence of machined materials during dry drilling of stacks with «polymer composite material – titanium alloy» structure // *IrGTU Bulletin.* – 2013. – № 10(81). – PP. 36–42. EDN: RGSXJV
6. Svinin V.M., Shutenkov A.V., Ponomarev B.B. Determination of main technical parameters of designed automatic feed drilling machine // *iPolytech Journal.* – 2024. – Vol. 28. – № 2. – pp. 224–237. EDN: DQWDDT
7. Sultan A.Z. Minimum quantity of lubricant drilling of stainless steel using refined palm olein: Effect of coating tool on