

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОБРАБОТКИ И МЕТОДА ОХЛАЖДЕНИЯ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ НА ПОТРЕБЛЯЕМУЮ МАКСИМАЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ, ВЫСОТУ ОБРАЗОВАВШИХСЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ЗАУСЕНЦЕВ И ПОЛУЧАЕМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ДИАМЕТРА

Сверление является чрезвычайно важным процессом, широко используемым при производстве топливно-регулирующей аппаратуры. Перспективным для современной промышленности является устойчивый процесс сверления алюминиевого сплава, при котором снижается потребление энергии и охлаждающей жидкости без ущерба для качества изготовления деталей. В этой статье исследуются влияние подачи и скорости вращения шпинделя на потребляемую максимальную мощность, высоту образовавшихся при сверлении заусенцев и получаемое отклонение диаметра просверленного отверстия.

**Ключевые слова:** сверление, сплавы, алюминий, точность, отклонение, отверстие, обработка.

**1. Введение.** Сверление является распространенным процессом механической обработки для изготовления отверстий. Алюминиевые сплавы являются одними из самых универсальных конструкционных материалов с точки зрения их легкости, коррозионной стойкости, электро- и теплопроводности, пригодности для обработки и т. д. Алюминий имеет низкую плотность  $2,7 \text{ г/см}^3$  по сравнению с  $7,87 \text{ г/см}^3$  для сталей. Обычно они легче (примерно в один-три раза) стали; однако их свойства с точки зрения удельной прочности и ударной вязкости почти аналогичны некоторым сталям. Кроме того, алюминиевые сплавы относительно дешевы. В промышленности для изготовления деталей широко применяются операции механической обработки, особенно сверления. Сверление деталей обычно выполняется в конце производственных процессов, чтобы сделать отверстия для сборки конечного узла с использованием подходящих крепежных деталей. Некоторые дефекты, такие как трещины, заусен-

цы и деформация поверхности, могут появиться во время операций сверления, что может привести к ухудшению технических характеристик деталей и выходу его из строя.

Распространенной проблемой при сверлении отверстий в металлических материалах является нерациональное использование охлаждающей жидкости более чем в 68 % случаев [1]. Несоблюдение параметров резания, таких как режим обработки и подача смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) в процессе сверления, может привести к поломке инструмента, высокому потреблению энергии и низкому качеству полученных деталей [2].

Если после операции сверления отверстие не имеет требуемого качества, то потребуются дополнительные процессы обработки, такие как развертывание и снятие заусенцев, для достижения требуемого качества.

С точки зрения обрабатываемости, алюминиевый сплав АЛ4-Т6 лучше поддается механической

обработке, чем другие металлы, с высокой применимостью в топливно-регулирующей аппаратуре, такие как сталь и титан, благодаря стабильному формированию стружки и легко поддается обработке [3]. По сравнению с другими высокопроизводительными сплавами (например, стали и титана), силы резания, температура резания и энергия, затрачиваемая на обработку алюминиевых сплавов, относительно низкая, что делает их хорошей альтернативой для достижения высокой производительности [4]. Мягкие и пластичные свойства алюминиевого сплава могут привести к термическому размягчению материала во время обработки, что вызывает образование наростов на кромке режущего инструмента и прилипание материала к обрабатываемой поверхности. Следовательно, это приводит к ухудшению чистоты обработанной поверхности и качества отверстий.

В этом исследовании рассматривается наиболее устойчивый метод охлаждения зоны резания вместе с наилучшей комбинацией параметров резания для снижения энергопотребления без влияния на общее качество получаемого отверстия. Вращение сверла создает трение и тепло, которое отводят из рабочей зоны с помощью СОЖ [4]. В процессе сверления из зоны резания отводится около 20–35 % тепла, что значительно ниже, чем при фрезеровании и токарной обработке [5].

**2. Постановка задачи.** В исследовании изучалось влияние трех конкретных условий резания, а именно обработка с СОЖ, с охлаждением сжатым воздухом и обработка без охлаждения. Качество просверленных отверстий оценивалось по высоте полученных заусенцев и максимальному отклонению геометрии диаметра. Основное новшество заключается в демонстрации влияния одновременных взаимодействий входных переменных, а именно подача, скорость вращения шпинделя и потребляемая мощность при резании, на результаты сверления, чтобы иметь хорошее представление о комбинированном влиянии различных параметров процесса обработки.

Значения параметров были выбраны на основе имеющейся в литературе информации [6], мощности станка и рекомендаций поставщиков режущего инструмента. Сверление производилось на токарно-фрезерном центре INTEGREX с ЧПУ фирмы Mazak (Япония). Максимальная мощность измерялась с помощью стойки ЧПУ Mazatrol. Измерения максимального отклонения диаметра производились с помощью кругломера Talylond. Высота заусенцев измерялась с помощью микрометра с линейной шкалой.

Последовательность измерений была следующей: (а) записывались значения мощности в процессе сверления, (б) измерялась погрешность диаметра, (в) измерялась высота заусенца.

**3. Проведение эксперимента.** В эксперименте использовались спиральные сверла из быстрорежущей стали P6M5 без покрытия. Сверление отверстий производилось в блоке из алюминиевого сплава AL4-T6 размером 90×70×15 мм. Сверла имели диаметр 10 мм и угол при вершине 118°, были выполнены по ГОСТу 10902-77 [6].

Режущие инструменты, с точки зрения геометрии инструмента, являются важными факторами, которые необходимо определить перед проведением операций сверления, поскольку они влияют на качество поверхности получаемого отверстия. Спиральное сверло, выполненное по ГОСТу 10902-77,

является распространенным типом сверла, которое используется при сверлении алюминия, поскольку оно имеет оптимальный угол спиральной канавки для облегчения эвакуации стружки. Угол винтовой линии — это угол, который образуется между передней кромкой сверла и осью сверла [7]. Для сверления алюминия AL4-T6 обычно используется угол наклона спирали, равный 30°. Угол при вершине, который является формой угла между режущими кромками, также важен для обеспечения эффективности сверления.

Скорость резания измеряется с точки зрения скорости, с которой внешняя или периферийная часть инструмента движется к обрабатываемой детали. Известно, что увеличение скорости резания приводит к уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности из-за улучшения сдвига материала [8]. На основании [9], в которой были проведены эксперименты по сверлению со скоростями резания 180, 200, 220 и 240 м/мин, установлено, что шероховатость поверхности алюминиевых сплавов уменьшается на 5,49 % при увеличении скорости резания со 180 до 240 м/мин. Однако увеличение скорости резания может увеличить вибрацию инструмента, что влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности. Эта точка зрения подтверждается исследованиями [10], в которых сообщается, что увеличение скорости резания может увеличить вибрацию инструмента, вызванную вращением шпинделя, что приводит к ухудшению качества обработанной поверхности. Во избежание вибрации инструмента из-за высокой скорости резания во время сверления перед началом операции сверления необходимо обеспечить правильную фиксацию инструмента с минимальным биением и фиксацию рабочего материала. Кроме того, высокая скорость резания может вызвать повышение температуры резания между инструментом и заготовкой из-за сильного нагрева, выделяемого во время операций сверления, что может привести к более высокой скорости износа инструмента. Когда скорость резания увеличивается, температура резания также увеличивается, что может привести к прилипанию материала заготовки к режущим кромкам. Это подтверждается исследованием [11], которое показало, что увеличение скорости резания с 60 до 100 м/мин приводит к увеличению температуры резания со 190 до 240°C при сверлении алюминиевого сплава. Другое предыдущее исследование [12] показывает, что износ по задней поверхности увеличился с 0,09 до 0,20 мм за счет увеличения скорости резания со 180 до 240 м/мин при подаче 0,1 мм/об, что также привело к уменьшению шероховатости поверхности с 4 до 3 мкм. Хотя более высокая скорость резания вызывает повышенный износ инструмента, использование слишком низкой скорости резания не рекомендуется, так как это может привести к образованию наростов на режущей кромке, что приводит к ухудшению шероховатости обрабатываемой поверхности, а также становится причиной низкой производительности. По данным [12], при сверлении с низкой скоростью резания 40 м/мин наблюдалось образование нароста, что приводит к шероховатости поверхности Ra 1,16 мкм. Таким образом, использование умеренных скоростей резания в диапазоне от 100 до 220 м/мин обычно рекомендуется при сверлении алюминиевых сплавов для поддержания хорошей производительности.

Скорость подачи является основным фактором, влияющим на образование стружки, силы реза-

Параметры эксперимента

№ эксп.	Подача, мм/об	Скорость, об/мин	№ эксп.	Подача, мм/об	Скорость, об/мин
1	0,05	500	8	0,05	500
2	0,05	1500	9	0,1	500
3	0,05	3000	10	0,15	500
4	0,05	4500	11	0,2	4500
5	0,2	500	12	0,05	4500
6	0,2	3000	13	0,1	4500
7	0,2	4500	14	0,15	4500

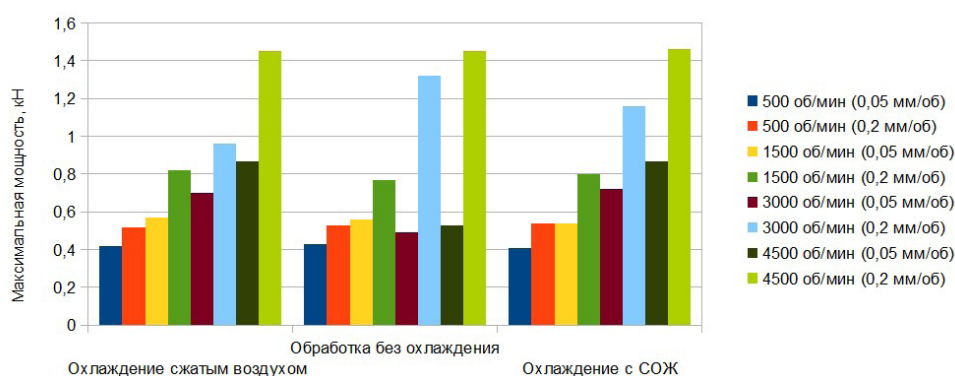


Рис. 1. Значения максимальной мощности при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

ния и качество отверстия. Скорость подачи — это расстояние, на которое сверло входит в заготовку за каждый полный оборот режущего инструмента. Диапазон скоростей подачи, которые обычно используются при сверлении алюминия АЛ4-Т6, находится в пределах от 0,01 до 0,2 мм/об. Исследование [13] показало, что увеличение скорости подачи с 0,05 до 0,25 мм/об при постоянной скорости резания 50 м/мин приводит к увеличению осевого усилия с 825 до 1020 Н и образованию непрерывной стружки, которая может запутываться в канавки сверла, что приводит к ухудшению качества обработанной поверхности. В другом исследовании [14] изучалось влияние подачи на просверленных отверстиях и обнаружилось, что при высоких скоростях подачи происходит ухудшение формы отверстий. Это происходит из-за высоких осевых усилий, вызванных образованием толстой стружки. Как правило, при сверлении алюминия рекомендуется использовать низкую скорость подачи, так как оно вызывает низкое осевое усилие, обеспечивает хорошее качество обработанной поверхности и продлевает срок службы инструмента.

Одно сверло использовалось для сверления только одного отверстия, чтобы свести к минимуму влияние износа инструмента на получаемые значения. План эксперимента указан в табл. 1.

Максимальная мощность при сверлении металла в основном определяется скоростью резания, скоростью подачи, методом подачи СОЖ и геометрическими параметрами инструмента передним, такими как угол инструмента. Результат исследования

представлен на рис. 1 и рис. 2 для разных подач и при разных скоростях резания соответственно при разных способах охлаждения зоны резания.

Общая тенденция заключается в том, что, независимо от используемых охлаждающих жидкостей, более высокие результаты скорости и подачи приводят к более высокой максимальной мощности. Поскольку при увеличении скорости резания происходит значительное увеличение максимальной мощности (рис. 2), поэтому можно констатировать, что воздействие скорости резания выше, чем воздействие из-за изменения подачи. Среднее отклонение максимальной мощности за счет прироста скорости при постоянной подаче составило около 70,4 % из-за большого прироста скорости от 500 об/мин до 4500 об/мин. Но среднее отклонение максимальной мощности из-за приращения подачи при постоянной скорости составляло около 34 % и могло быть связано с увеличением подачи от 0,05 до 0,2 мм/об. Следовательно, увеличение только одного параметра (подачи или скорости) может привести к увеличению максимальной мощности. Однако следует отметить, что общая мощность при сверлении отверстия рассчитывается на основе продолжительности всего процесса. Продолжительность этого процесса минимизируется с увеличением скорости подачи. Приращение скорости сокращает продолжительность процесса и не приведет к значительному приросту мощности, поэтому наилучшей комбинацией для снижения энергопотребления может быть низкая скорость резания и высокая подача. Прочность заготовки также зависит от параметров обработки за счет деформационного

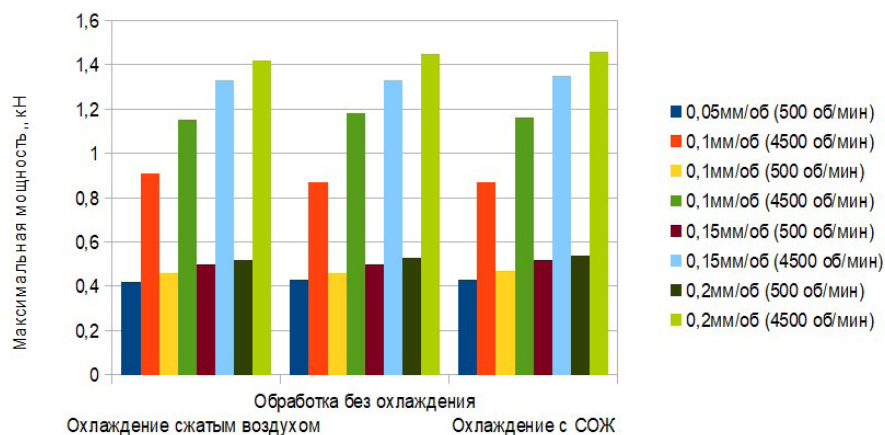


Рис. 2. Значения максимальной мощности при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

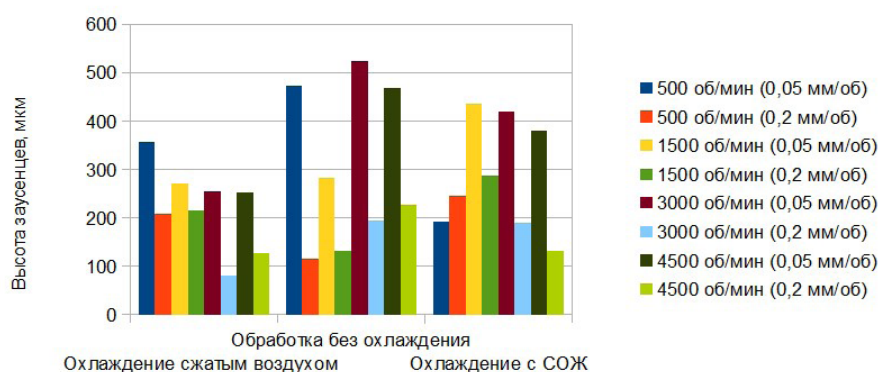


Рис. 3. Значения максимальной высоты заусенцев при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

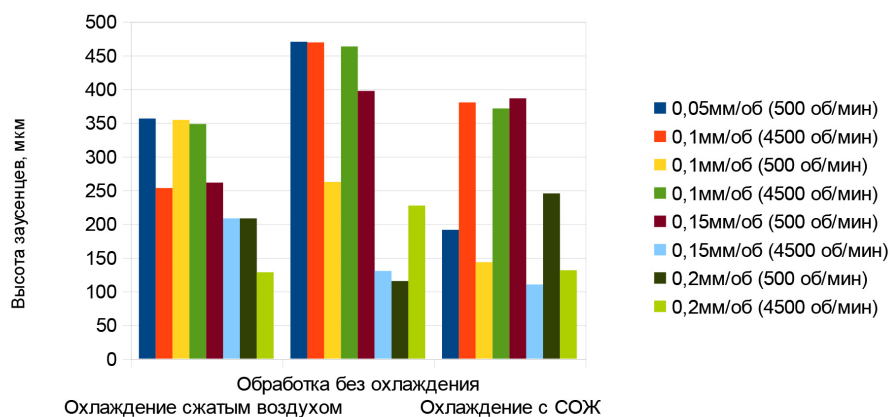


Рис. 4. Значения максимальной высоты заусенцев при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

упрочнения и термического разупрочнения. Более высокая подача и скорость приводят к более высокой скорости деформации, которая локально упрочняет материал заготовки. Глубина резания, подача и скорость вызывают значительный сдвиг материала, а также трение в зоне резания на границе между режущим инструментом-материалом заготовки. Это значительно повышает локальную температуру обработки, что локально размягчает материал заготовки [15].

Свойства материала, термическое размягчение, деформационное упрочнение, трение и толщина последнего слоя материала, подлежащего обработке, играют важную роль в образовании заусенцев [16].

Заусенец — это выступ материала заготовки, как правило, на краях отверстия (вход и выход из отверстия). При обработке алюминиевых сплавов образуются твердые и острые заусенцы, что может вызвать трудности при сборке и привести к трав-

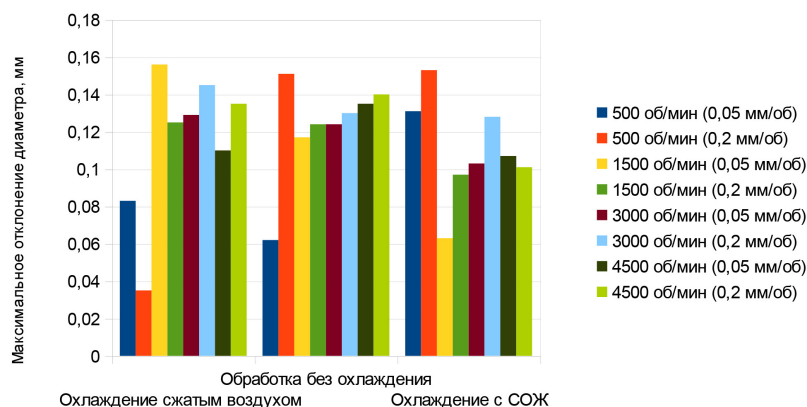


Рис. 5. Значения максимального отклонения диаметра при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

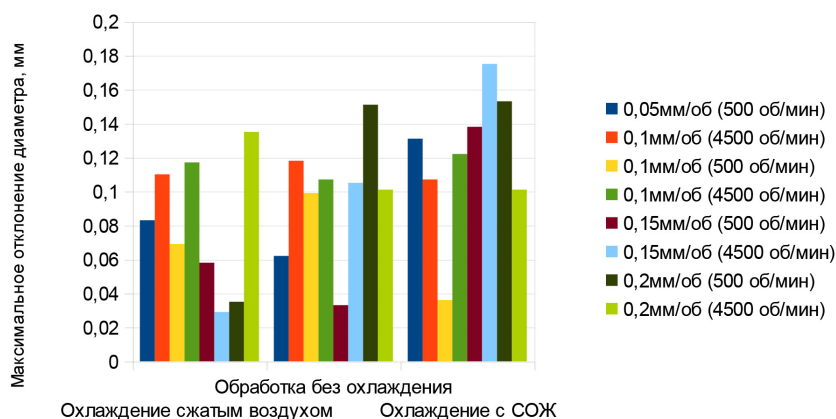


Рис. 6. Значения максимального отклонения диаметра при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

мам сборщика. Поэтому получение заусенцов нежелательно для обеспечения хорошей сборки деталей. Процесс обработки может привести к первичным и вторичным заусенцам. Краевой заусенец возникает во время операций сверления после удаления материала режущими кромками. Вторичный заусенец — это оставшийся материал на краю просверленного отверстия после поломки основного заусенца в процессе удаления заусенцев.

По мере того, как сверло продвигается вперед с большей деформацией материала и наконец достигает своего предела (напряжение разрушения), разрушение начинается в центре отверстия. Благодаря тонкому слою материала на конце образуется заусенец. При обработке пластичного материала его деформация и удлинение приводят к нежелательному выступу [17]. Высота заусенцев уменьшается при увеличении подачи и снижении скорости резания.

Влияние параметров сверления при различных способах охлаждения рабочей зоны на высоту заусенца показано на рис. 3, рис. 4. При обработке без охлаждения высота заусенцев имеет тенденцию к уменьшению с увеличением скорости подачи и оптимизируется при самой высокой скорости подачи (0,2 мм/об) и самой низкой скорости резания (500 об/мин). При обработке с охлаждением сжатым воздухом минимальная высота заусенцев достигается при самой средней скорости подачи (0,15 мм/об) и самой высокой скорости резания (4500 об/мин). Минимальная высота заусенцев при

обработке с охлаждением СОЖ достигается при самой высокой скорости подачи (0,2 мм/об) и самой низкой скорости резания (500 об/мин).

Погрешность диаметра просверленных отверстий при различных параметрах сверления показана на рис. 5 и рис. 6. Оптимальные скорость резания и подача при обработке с охлаждением сжатым воздухом равны 4500 об/мин и 0,1 мм/об соответственно, для обработки без охлаждения 0,05 мм/об и 500 об/мин, для обработки с охлаждением с СОЖ 0,1 мм/об и 500 об/мин.

При скорости резания, отличной от 3000 об/мин, ошибка составляет более 0,1 мм для всех скоростей подачи и при всех способах охлаждения. Следовательно, верно, что скорость резания оказывает значительное влияние на изменение погрешности диаметра при постоянной скорости подачи, и в обоих случаях наблюдалась нелинейная картина.

**4. Результаты эксперимента.** Основываясь на полученных результатах, можно утверждать, что минимальная потребляемая мощность, высота заусенцев и погрешность диаметра полученных отверстий при сверлении без охлаждения соответствует режимам подачи 0,2 мм/об и скорости вращения шпинделя 500 об/мин. При обработке с охлаждением сжатым воздухом минимальные измеряемые значения полученных отверстий соответствуют подаче 0,2 мм/об и скорости вращения шпинделя 500 об/мин. При обработке с подачей СОЖ в зону резания минимальные значения мощности, высоты заусенцев и погрешности диаметра полученных от-



верстий соответствуют подаче 0,1 мм/об и скорости вращения шпинделя 500 об/мин.

**Выводы.** По результатам работы определены значения подачи и скорости вращения шпинделя при сверлении отверстий в блоке алюминиевого сплава АЛ4-Т6, при которых достигаются минимальные значения потребляемой мощности, высоты заусенцев и погрешность диаметра полученных отверстий.

#### Библиографический список

1. Vasil'ev E. V., Makashin D. S., Chernykh I. K. Influence of forms and geometric parameters of sharpening of the chisel edge on the cut chip thickness throughout the cutting edges of a twist drill // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1210 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012157.
2. Васильев Е. В., Макашин Д. С., Черных И. К. Влияние форм и геометрических параметров подточки поперечной режущей кромки на толщину среза по длине режущих кромок спирального сверла // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6, № 1. С. 154–162. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-154-162.
3. Кирсанов С. В., Гречишников В. А., Схиртладзе А. Г. [и др.]. Повышение эффективности обработки точных отверстий в машиностроении. Москва: Глобус, 2001. 181 с.
4. Кисель А. Г., Макашин Д. С., Аверков К. В., Ражковский А. А. Зависимость эффективности СОЖ от их физических показателей // *Вестник машиностроения*. 2018. № 4. С. 41–44.
5. Макашин Д. С. Влияние геометрических параметров спирального сверла на отклонение от цилиндричности при сверлении титанового сплава // *Омский научный вестник*. 2011. № 2 (100). С. 40–44.
6. Балла О. М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 368 с.
7. Лашков А. С., Макашин Д. С., Минцева Т. А., Никитина А. В., Васильев Е. В. Повышение точности изготовления отверстий в деталях из нержавеющей стали // *Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам XXXIV Междунар. науч.-практ. конф.* 2017. С. 500–508.
8. Расщупкин А. В., Макашин Д. С. Повышение точности формообразования поверхности твердосплавным осевым инструментом // *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность*. 2011. № 1. С. 115–116.
9. Назаров П. В., Васильев Е. В., Попов А. Ю. Инновационная технология обработки деталей, применяемых в авиационной промышленности // *СТИН*. 2015. № 3. С. 38–40.
10. Макашин Д. С. Влияние геометрических параметров спирального сверла на отклонение от цилиндричности при сверлении титанового сплава // *Омский научный вестник*. 2011. № 2 (100). С. 40–42.
11. Santos M. C., Machado A. R., Sales W. F. [et al.]. Machining of aluminum alloys: A review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86 (9). P. 3067–3080. DOI: 10.1007/s00170-016-8431-9.
12. Гимадеев М. Р. Получение заданных параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании цилиндрических отверстий // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2016. № 1 (25). С. 66–72.
13. Mydin N. M., Dahnal A. N., Raof N. A. [et al.]. The effect of chilled air on Burr formation when drilling Aluminium alloy in manufacturing industry // *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*. 2021. Vol. 28 (1). P. 437–445.
14. Гуськов А. М., Воронов С. А., Киселев И. А. [и др.]. Обзор литературных источников по моделированию динамики процесса сверления // *Наука и образование*. 2015. № 12. С. 240–265.
15. Aamir M., Giasin K., Tolouei-Rad M. [et al.]. A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for

aerospace applications // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9 (6). P. 12484–12500. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.09.003.

16. 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.
17. Пятых А. С. Моделирование вибрационной устойчивости процесса сверления // *Механики XXI века: материалы XVI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием*. Братск, 2017. № 16. С. 133–137.

**КИСЕЛЬ Антон Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск; доцент кафедры инжиниринга технологического оборудования Калининградского государственного технического университета, г. Калининград.

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» Машиностроительного института Омского государственного технического университета ОмГТУ, г. Омск; доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 1763-1883

AuthorID (РИНЦ): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

Адрес для переписки: dima.makashin@gmail.com

**БЕЛАН Дмитрий Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 5665-3129

AuthorID (РИНЦ): 540187

AuthorID (SCOPUS): 57192306912

Адрес для переписки: baltazar.13@mail.ru

**АВЕРКОВ Константин Васильевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 8407-0488

AuthorID (РИНЦ): 674150

AuthorID (SCOPUS): 55257667700

Адрес для переписки: averok@yandex.ru

#### Для цитирования

Кисель А. Г., Макашин Д. С., Белан Д. Ю., Аверков К. В. Влияние режима обработки и метода охлаждения зоны резания на потребляемую максимальную мощность, высоту образовавшихся при сверлении заусенцев и получаемое отклонение диаметра // *Омский научный вестник*. 2023. № 1 (185). С. 19–24. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-19-24.

Статья поступила в редакцию 02.09.2022 г.

А. Г. Кисель, Д. С. Макашин, Д. Ю. Белан, К. В. Аверков