

## 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 отверстия.

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 Р6М5 без покрытия. Сверление отверстий производилось в блоке из алюминиевого сплава АЛ4-Т6 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 АЛ4-Т6 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

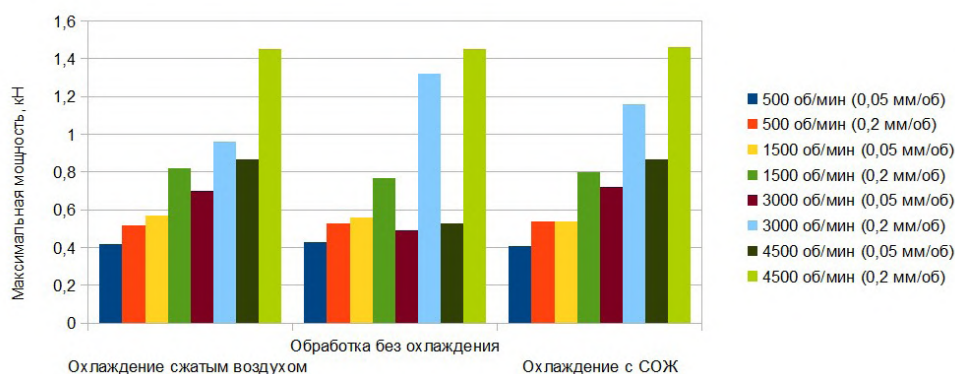


Рис. 1. Значения максимальной мощности при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

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

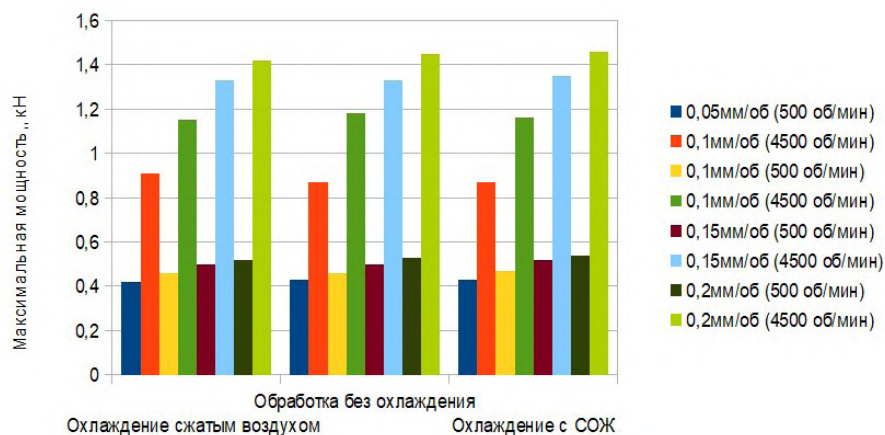


Рис. 2. Значения максимальной мощности при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

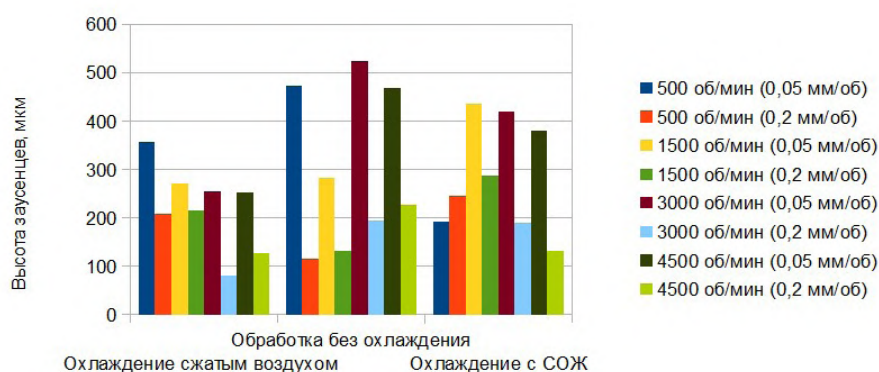


Рис. 3. Значения максимальной высоты заусенцев при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

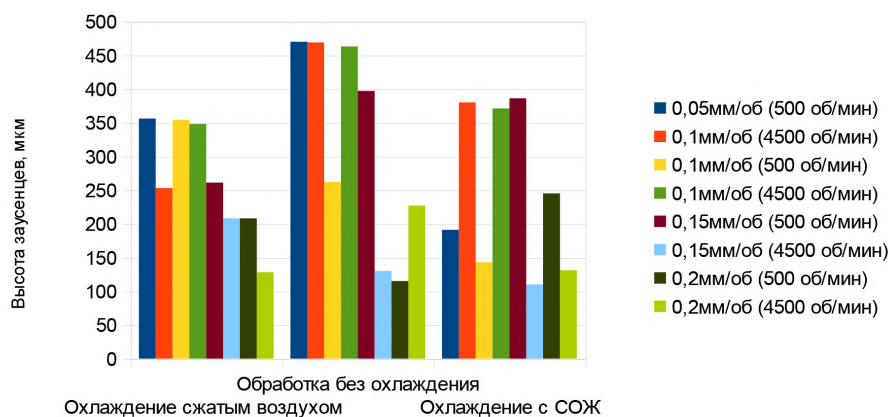


Рис. 4. Значения максимальной высоты заусенцев при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

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-



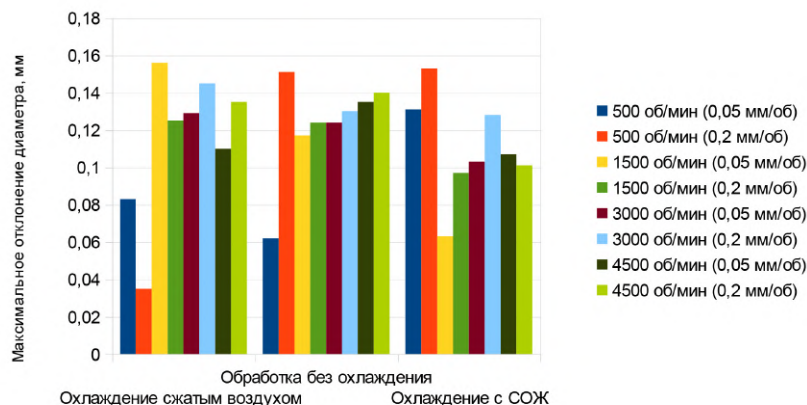


Рис. 5. Значения максимального отклонения диаметра при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

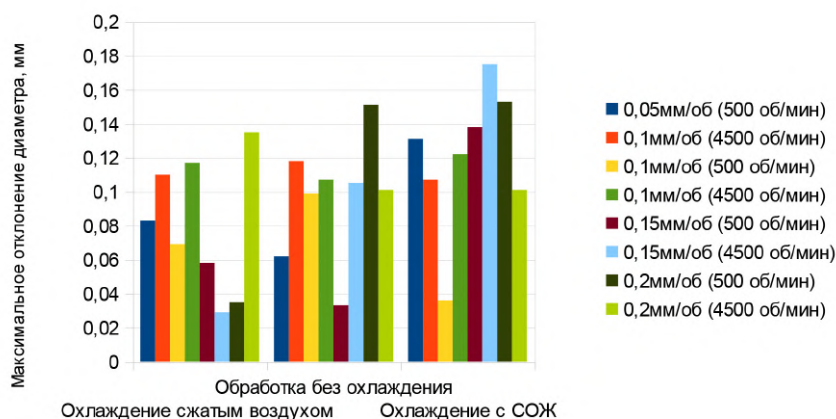


Рис. 6. Значения максимального отклонения диаметра при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

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

- 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.
- 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.
- Кирсанов С. В., Гречишников В. А., Схиртладзе А. Г. [и др.]. Повышение эффективности обработки точных отверстий в машиностроении. Москва: Глобус, 2001. 181 с.
- 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.
- 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.
- Балла О. М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 368 с.
- 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.
- Расщупкин А. В., Макашин Д. С. Повышение точности формообразования поверхности твердосплавным осевым инструментом // *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность*. 2011. № 1. С. 115–116.
- Назаров П. В., Васильев Е. В., Попов А. Ю. Инновационная технология обработки деталей, применяемых в авиационной промышленности // *СТИН*. 2015. № 3. С. 38–40.
- 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 // *Механика 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