

УДК 621.7.02

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-26-35

В.Е. Иноземцев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СОВМЕЩЁННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МЕДНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрен эффект совмещения различных видов обработки, основанных на силовом физическом воздействии на поверхность токопроводящих материалов и электрохимическом активном действии электролитов, выполняющих роль смазочно-охлаждающей среды. В основе материалов статьи лежат результаты как экспериментальных исследований, так и математической обработки полученных статистических данных. Новизна исследования заключается в определении закономерностей затя-

гивания пор при чистовой механической обработке металлокерамики и определения степени влияния условий обработки на затягивание пор, а также в определении эффективных условий чистовой обработки алюминиевых сплавов при комбинированном методе формообразования.

Ключевые слова: силумин, металлокерамика, чистовая обработка, шероховатость, пористость, комбинированная обработка, качество.

V.E. Inozemtsev

INVESTIGATION OF COMBINED METHOD USE FOR COPPER AND ALUMINUM ALLOY PROCESSING

The work purpose: the investigation of obtaining by a surface the required properties and possibility degree to control shaping processes. It is well-known that a shaping process is affected by many factors particularly at complex methods of processing. The analysis of machining condition impact upon surface layer quality of parts allows defining optimum parameters of cutting and increasing parts operation characteristics.

Investigation methods: theory, experimental researches, statistical processing of results, mathematical modeling, analysis.

Research results: there are defined criteria of surface quality at complex methods of shaping, roles of factors included in processing, mathematical models are formed, recommendations are formulated.

Novelty: it consists in the definition of regularities in pore covering at metal ceramic finish machining and definition of processing conditions impact upon pore covering, and also in the definition of efficient

conditions of aluminum alloy finishing at the combined method of shaping.

Conclusions: as the investigations carried out show the combined methods of impact upon a surface at parts shaping allow reducing also cutter wear, minimizing collateral processing factors connected with heat generation, with increased friction forces and surface layer deformation of a billet at its processing. The combination of machining with electro-chemical processing allows not only having an influence considerable upon surface quality increase, but decreasing technological residual stresses and also contributing to the restoration of mechanical and physical properties of metal surfaces after electro-erosion processing at the expense of surface micro-layer elimination with the acquired thermal changes of structures.

Key words: silumin, ceramic metal, finishing, roughness, porosity, combined processing, quality.

Введение

Широкий спектр алюминиевых сплавов, производящихся и находящих широкое применение во всех отраслях мировой промышленности, обусловлен своим наличием предъявляемыми технологическими требованиями к характеристикам и качеству продукции, а также высокими стандартами к обеспечению безопасной и эффективной работы готовой продукции в транспортной сфере, информационно-технологической, космической, энергетической и многих других. Всё это требует

постоянного контроля качества производства деталей и качества обработки их поверхностей. При этом повышающиеся требования к готовой продукции напрямую указывают необходимость совершенствовать технологии обработки материалов, и очень часто менять технологию формообразования при применении рациональных методов и технологических решений, снижая трудоёмкость процессов при сокращении числа операций.

Особенности обработки пластичных материалов на металлической основе

Механическая обработка материалов на основе алюминия сопряжена с задирами пластов деформированного материала на полученной поверхности [1] и прилипанием алюминия к передней поверхности инструмента. Всё это ухудшает эффективность формообразования лезвийным методом, а также способствует повышению тепловыделения (повышенных сил трения) и соответствующему износу инструмента. Рекомендуется использовать специальные режущие пластины с углеродным покрытием (механические характеристики близкие к алмазу) и другими износостойкими покрытиями. При этом режущий инструмент должен обладать большим передним углом, малым радиусом округления режущей кромки ρ и минимальным радиусом вершины инструмента r . Для увеличения теплоотвода в отдельных случаях, когда ведётся обработка тонкостенных деталей (типа втулок), необходима обильная подача смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) в зону резания. Также в целях снижения шероховатости возможно добавление в СОТС химических реактивов, снижающих прочность удаляемого слоя материала. Таким образом анодно-механическая обработка силумина с применением раствора каустической соды позволила получить поверхность с шероховатостью Ra 0,6-0,7 мкм, скорость резания составляет около 214 м/мин, подача

инструмента 0,05 мм/об, глубина резания 0,5 мм. Режущий инструмент представлял собой сменная твёрдосплавная пластина чашечной формы.

Такие операции чистовой обработки осевым инструментом, как развёртывание рекомендуется проводить на низких скоростях резания. Развёртывание отверстий в алюминиевых сплавах рекомендуется выполнять с помощью развёрток с прямыми или спиральными канавками [2]. Развёртки со спиральными канавками снижают вибрацию инструмента и позволяют улучшить шероховатость на поверхности обрабатываемой детали. Подачу для машинного развёртывания рекомендуется выбирать в зависимости от материала режущего инструмента, при этом подача может составлять 0,3–1 мм/об [2].

В процессе лезвийной обработки металлокерамики поверхностные поры закатываются срезаемым слоем под действием сил резания. Пористость поверхности таким образом сокращается почти в 1,7–2 раза. В связи с этим возникает необходимость определения режимов и условий обработки, позволяющих максимально снизить затягивание пор на полученной поверхности. Структура пористой металлокерамики и характер затягивания пор в результате механической обработки пористых металлокерамических материалов представлены на рис. 1–2.

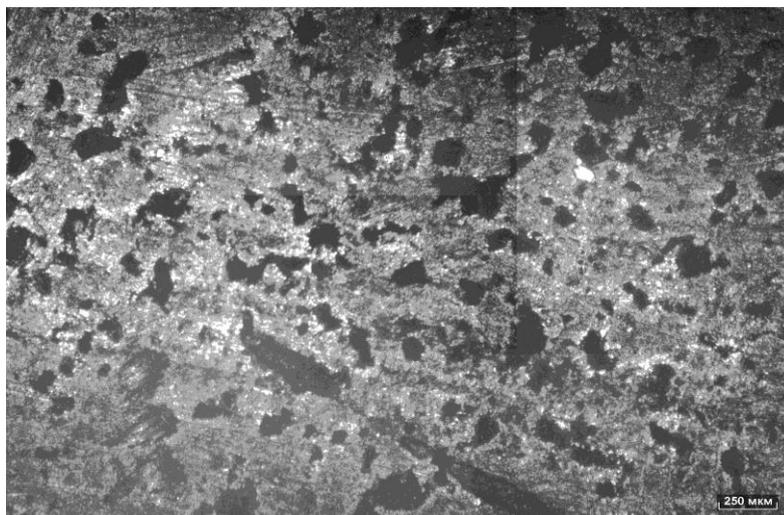


Рис. 1. Пористая структура бронзографита ($\times 50$)

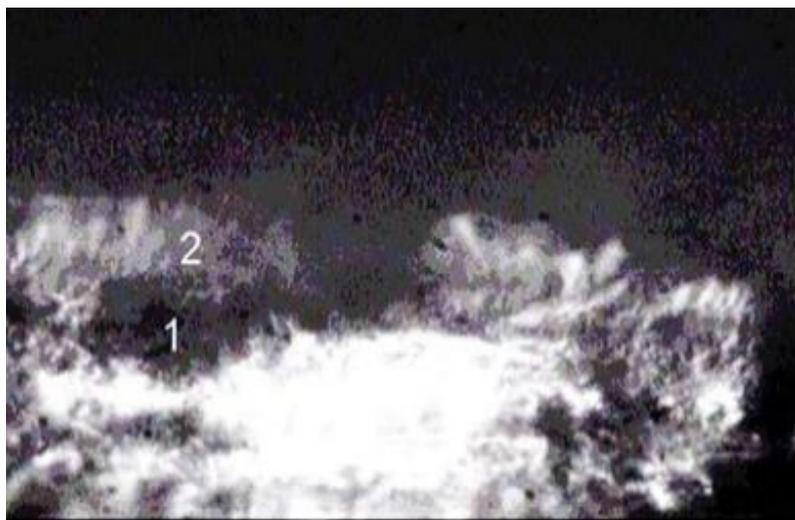


Рис. 2. Закрытая пора после механической обработки бронзографита ($\times 500$): (1 – кратер поры; 2 – наплыв после механической обработки)

Задачи исследования

В связи с особенностью свойств пористых труднообрабатываемых материалов, имеющих повышенную вязкость, пониженную температуру плавления и сравнительно невысокую прочность (в отличие от сталей и железных сплавов) возникает необходимость найти решение для их обработки, позволяющее в максимальной степени сохранить их поверхностную пористость и минимизировать деформационные процессы в приповерхностных слоях.

Для обработки медных и алюминиевых сплавов также очень важным остаются вопросы обеспечения высокого качества поверхности, которые очень часто не могут быть получены с помощью лезвийной

обработки в связи с особенностью свойств материалов и низкой степенью их обрабатываемости. Применение совмещённых методов обработки позволяет подойти к решению проблемы, но необходимо установить степень влияния различных факторов таких процессов на формирование профиля поверхности деталей.

Таким образом, необходимо исследовать влияние типа обработки на качество поверхности, влияние типа материала на качество обработки, роль электрических параметров, роль применяемых электролитов и смазочно-охлаждающих сред при обработке, парное взаимодействие различных факторов.

Проведение исследования

С целью повышения пористости поверхности металлокерамических спечённых материалов необходимо использовать рациональные режимы резания. Установлено, что на изменение пористости при механической обработке существенное влияние оказывают такие факторы, как вид материала применяемого режущего инструмента, скорость резания, величина подачи, глубина резания, геометрические параметры режущего инструмента, наличие и вид применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) [3]. Таким образом, при исследовании процесса резания бронзографита и

железографита установлено, что для пористых металлокерамических материалов с пористостью поверхности от 18% до 25 % наиболее рациональным является использование высоких скоростей резания, применение твёрдосплавного инструмента с износостойким покрытием с минимальным радиусом вершины, имеющим минимальное округление режущей кромки [4]. Передний и задние углы режущего инструмента должны находиться в рекомендуемых пределах – соответственно $\gamma = 4-5^\circ$, $\alpha = 7-8^\circ$, рекомендованная подача не должна превышать 0,05 мм/об, глубина резания должна быть минимальной, но не менее,

чем величина радиуса вершины режущего инструмента. Для чистовой механической обработки металлокерамических материалов рекомендуется использовать водорастворимые СОТС: Укринол-1М, Велс-1М. Данных мер возможно будет достаточно, если на полученной поверхности пористость и шероховатость будут соответствовать техническим требованиям к поверхности пористых металлокерамических материалов.

Комбинированной операции травления и чистовой обработки твёрдосплавным инструментом с покрытием нитрида титана подвергались 28 заготовок из бронзографита марки БрОГрЗН. Все экспериментальные данные, были достигнуты при значениях напряжения и силы тока, которые изменялись соответственно в диапазонах 3–28 В и 0,2–2,4 А. Наилучшие результаты обработки были получены при значении напряжения 28 В, силе тока 2,4 А. При этом максимальное значение пористости

поверхности металлокерамической втулки составила около 24,7 %, процесс резания с применением активированной СОТС длился в течении 34 секунд, среднее значение шероховатости поверхности после обработки составило около Ra 1,06 [3].

Как показали результаты комбинированной чистовой обработки, выбор оптимальных условий чистовой механической обработки оказывает значительное влияние на результаты травления и качество получаемой поверхности. Механическая обработка поверхности твёрдосплавным инструментом с покрытием нитрида титана способствует улучшению качества результатов как для комбинированного метода, так и для обычной механической обработки.

Изображение травлёной поверхности бронзографитовой втулки с полученной шероховатостью Ra 1,225 представлено на рис. 3.

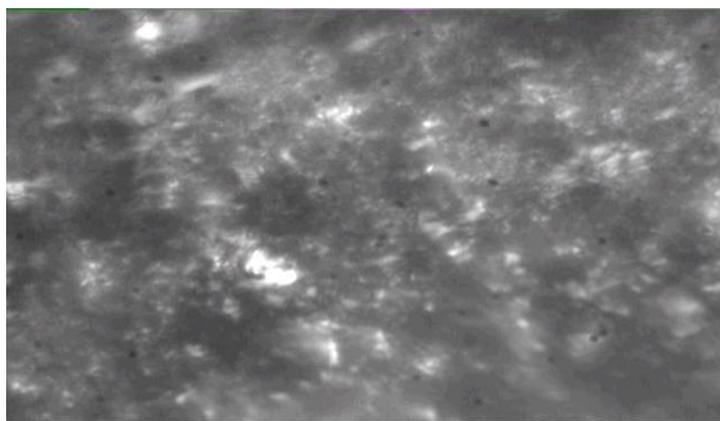


Рис. 3. Бронзографит, обработанный с активацией СОТС, Ra 1,225 (x120)

Таким образом, заготовки из бронзографита, прошедшие комбинированную обработку с СОТС, включая чистовую механическую на низких скоростях (Ra 0,41 – 0,50) и высоких скоростях (Ra 0,43 – 0,59) и травление в 25-% растворе сульфата меди, получили поверхность, обладающую значениями шероховатости Ra 0,85 – 1,02 и Ra 0,91 – 1,225 соответственно. Во всех случаях заготовки обрабатывались режущим инструментом из твёрдого сплава с износостойким покрытием нитрида титана с радиусом при вершине резца 0,4 мм.

Исследование результатов процесса обработки с активированной СОТС показало, что увеличение силы тока в цепи способствует увеличению скорости удаления меди с поверхностного слоя бронзографитовых втулок. Таким образом, при постоянном времени на операцию процесса обработки с активированной СОТС, которое составило 54 секунды и при величине тока 0,5 А была зафиксирована полученная пористость поверхности материала около 23,41 %, при этом, за тот же временной интервал, при токе 2,4 А величина по-

ристости бронзографита составила уже 23,84 %.

Увеличению пористости, а значит, и съёма поверхностного слоя спечённых металлокерамических материалов, способствует повышение напряжения и тока, проходящего через активированную СОТС, а также увеличение концентрации раствора сульфата меди. Помимо перечис-

ленных факторов необходимо учитывать свойства самого материала, подвергаемого механической обработке. Большое содержание меди в образцах исследуемой металлокерамики (около 82 %) способствует увеличению скорости процесса травления при чистовой механической обработке с активацией СОТС.

Определение оптимального значения пористости на поверхности изделий из бронзографита после обработки с электрической активацией СОТС методом крутого восхождения

В процессе исследований с учётом преобразований и учётом наибольшего влияния отдельных факторов была получена следующая математическая модель:

$$\bar{y} = 24,175 + 0,4x_1 + 0,095x_2 \quad (1)$$

где \bar{y} – шероховатость поверхности Ra после обработки, мкм; x_1 – скорость резания, м/мин;

x_2 – рабочий ток, А.

Учитывая, что и использовать строго фиксированные значения тока с шагом 0,07 А технически не представляется возможным, опыты проводились с округлением этих значений.

Как показали результаты опытов для построения крутого восхождения, после опыта №1 пористость стала снижаться. Таким образом, оптимальные условия резания достигнуты при проведении основных опытов и соответствуют значениям переменных факторов: $V = 141$ м/мин; $I = 2,4$ А. Падение пористости при дальнейшем увеличении скорости резания свыше 141 м/мин также имеет связь с ростом температуры резания, увеличением сил адгезии и увеличением нагрева обрабатываемой поверхности. Совместно с действием сил трения на гранях режущего инструмента это способствует закупориванию пор.

Выводы по электрохимикомеханической обработке бронзографита

В результате проведённого экспериментального исследования состояния поверхностного слоя изделий из бронзографита после чистовой механической обработки и влияния условий чистовой обработки на качество полученной поверхности и выполнения соответствующих расчётов установлено следующее:

- полученный результат показывает, что существует определённая связь между достигаемой пористостью поверхности после обработки и входными параметрами: подача; скорость резания; радиус вершины режущего инструмента;

- на обеспечение сохранности плотности пор после обработки, указанные выше факторы, влияют пропорционально, что подтверждается линейностью зависимости;

- возрастание скорости обработки ведёт к сохранению пористости металлокерамических деталей и повышению качества поверхности на промежуточных участках между порами;

- снижение подачи резца приводит к сохранению естественной плотности пор металлокерамических материалов, но при этом зафиксирован рост шероховатости;

- применение режущего инструмента с радиусом вершины более 0,4 мм способствует формированию поверхности с закрытыми порами и одновременному увеличению шероховатости профиля детали;

- наибольшую роль в обеспечении естественного уровня пористости имеет обработка с высокими скоростями и наименьшей подачей. Роль радиуса вершины резца имеет меньшее действие на формирование поверхностного слоя;

- как следует из оценки экспериментальных данных и их статистической обработки, совместное влияние подачи и радиуса вершины не оказывает большого эффекта на изменение пористости;

- наибольшая плотность пор (23,184 %) соответствовала процессу электрохимикомеханической обработки с СОТС режущим инструментом из твёрдого сплава, покрытой TiN . Скорость обработки составила порядка 141 м/мин, подача 0,05 мм/об, радиус вершины инструмента 0,4 мм;

- высокая скорость обработки и обильный полив СОТС имеют эффективное воздействие на сохранение пор поверхности деталей из металлокерамики и обеспечение низкой шероховатости по-

верхности на промежуточных участках между порами;

- обеспечение наибольших значений силы тока электрической цепи (в данном случае около 2,4 А) влияет положительно на сохранение естественной пористости металлокерамики;

- установлено наличие чёткой связи между достигаемой пористостью поверхности и входными параметрами экспериментов: скорость обработки, сила тока электрической цепи;

- наибольшая плотность пор бронзографита после электрохимикомеханической обработки (резцом со сменной многогранной пластиной из твёрдого сплава, покрытой TiN , со скоростью обработки 141 м/мин, токе цепи 2,4 А) составляет 24,7 %.

Электрохимикомеханическая комбинированная обработка силумина

Как показали результаты исследований, при лезвийной анодно-механической обработке в процессе резания силуминов образование окислов на обрабатываемой поверхности значительно ухудшает протекание электрохимических процессов. Особенно это значимо при анодном растворении алюминиевых сплавов, имеющих высокую способность к окислению.

Известно большое влияние состава электролита на показатели электрохимической обработки [5–7]. В качестве электролита использовались водные растворы $NaCl$ и $NaNO_3$. Как показали результаты

исследования (рис. 4) процессов формообразования, наиболее эффективным является использование 25–30 % водного раствора хлорида натрия $NaCl$. Дальнейшее увеличение концентрации раствора $NaCl$ более 30% снижает влияние анодного процесса на обеспечение требуемой шероховатости поверхности. Согласно исследованиям [8, 9] повышение концентрации электролита увеличивает вязкость раствора электролита, что приводит к уменьшению производительности процесса анодного растворения.

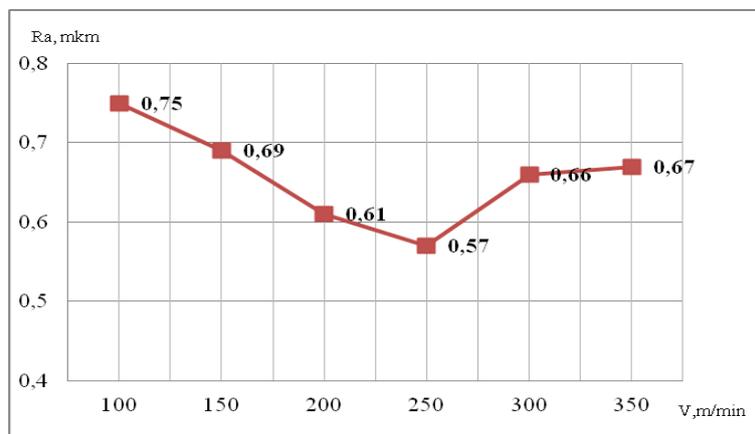


Рис. 4. Влияние концентрации электролита на качество поверхности силумина

Напряжение также оказывает влияние формирование шероховатости поверх-

ностного слоя при лезвийной анодно-механической обработке также влияет на

шероховатость обработанной поверхности, поэтому для исследований рассматривалось напряжение в пределах 12–24 В как способствующее наиболее лучшим результатам обработки. При значениях напряжения более 24 В возникает вероятность пробоа межэлектродного промежутка. При повышении напряжения в пределах указанного диапазона шероховатость на обработанной поверхности становится ниже.

В процессе исследований удалось выяснить, что при электрохимикомеханической обработке скорость обработки оказывает значительное влияние на шероховатость, а высокий уровень алюминия в опытных образцах силуминов (порядка 87 %) интенсифицирует процесс анодного растворения приповерхностного слоя. Таким образом, формообразование осуществлялось с высокими скоростями, и наиболее чистая поверхность заготовки из силумина ($Ra < 0,60$ мкм) может быть получена при обработке на скоростях около 200–300 м/мин. В качестве электролита рассматривался водный раствор (30%) $NaCl$.

Формообразование поверхности при обработке заготовки из силумина АК7 электрохимикомеханическим методом заключается в следующих стадиях: операция лезвийной механической обработки; затем анодное растворение металла. Статистическая обработка данных, полученных практическим путём, позволяет получить модель [10] описывающую формообразование при электрохимикомеханической обработке

$$Ra = \frac{\omega^{0,039}}{e^{0,106} \cdot V^{0,06} \cdot U^{0,082}}, \quad (2)$$

где Ra – шероховатость (мкм); V – скорость резания (м/мин); ω – концентрация электролита (%); U – напряжение в цепи (В).

Для чистовой и финишной обработки алюминия и его сплавов желательно выбирать скорость резания в диапазоне 400–500 м/мин [11]. Из практических исследований можно заключить, что анодно-механическая обработка должна проводиться со скоростями резания не выше,

чем 250 м/мин. Проведенные испытания стойкости режущего инструмента указывают, что снижение скорости обработки на чистовых и финишных операциях позволяет снизить интенсивность размерного изнашивания режущего инструмента почти в 3 раза, в то же время, получая при обработке существенно более чистую поверхность, чем при механической обработке (шероховатость снижается примерно в 2 раза). Одним из ряда преимуществ финишной лезвийной комбинированной анодно-механической обработки силуминов по сравнению с лезвийной обработкой считается снижение шероховатости получаемой поверхности ($Ra 0,6$ мкм, в то время, как при лезвийной обработке $Ra 1,3$ мкм), также отмечается существенное снижение интенсивности изнашивания инструмента (примерно в 3 раза) благодаря обработке на скоростях ниже, чем 400–500 м/мин. В случае применения чистовой лезвийной обработки минимальные значения шероховатости поверхности примерно составляют $Ra 1,25–1,3$ мкм. Таким образом, для получения шероховатости $Ra 0,6$ мкм требуется применять дополнительные технологические операции на этапах финишной обработки, что в свою очередь приводит к увеличению трудоёмкости всего технологического процесса формообразования поверхности.

Исследование особенностей процесса резбонарезания для отверстий диаметрами до 1 мм в заготовках из алюминиевого сплава методом лезвийной анодно-механической обработки позволяет [12] выявить линейную зависимость скорости растворения металла и суммарный крутящий момент на метчике.

За счёт действия анодно-механической обработки удаётся минимизировать влияние момента трения сходящей стружки M_c из за её постепенного растворения в среде электролита под действием подаваемого электрического тока. В данном случае поставлена задача не обеспечить растворения сходящего металла целиком, а обеспечить снижение общего объёма металла, уходящего в стружку и облегчить её сегментирование, что также позволит обеспечить удаление стружки из

зоны резания с помощью СОТС [12, 13]. Таким образом, при операции по нарезанию резьбы в отверстиях сверхмалого диаметра суммарный крутящий момент с применением анодно-механического растворения равен:

$$M_{рез} = M_p + M_c^n + M_{mv}, \quad (3)$$

где: $M_{рез}$ – крутящий момент на инструменте при резании; M_c^n – момент трения стружки; M_{mv} – момент трения, зависящий от скорости растворения металла; n – коэффициент учитывающий уменьшение объёма сходящей стружки в зоне резания за счёт анодно-механического растворения.

Поправочный коэффициент n зависит выхода по току η и отношения доли тока, затрачиваемого на растворение материала анода, к общему току.

Скорость растворения металла может быть определена [12] по формуле, устанавливающей зависимость скорости от закономерности взаимодействия указанных физических факторов:

$$V_n = \frac{c \times \eta}{\rho} \times \frac{(U - \Delta\phi) \times X}{a}, \quad (4)$$

Выводы

Как показывают проведённые исследования, комбинированные способы воздействия на поверхность при формообразовании тел деталей позволяют также сократить изнашивание режущего инструмента, минимизировать побочные факторы обработки, связанные с тепловыделением, повышенными силами трения и деформацией поверхностных слоёв заготовки при её обработке. Совмещение механической

где: $\Delta\phi$ – сумма электродных потенциалов, В (в большинстве случаев можно принять $\Delta\phi = 2-4$ В); X – удельная электропроводность электролита, $\text{Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$; Величина $V_{уд} = c \times \eta / \rho$ – удельная скорость растворения; ρ – плотность обрабатываемого материала; a – температурный коэффициент сопротивления.

Практические исследования показали [12, 14], что в результате обработки алюминиевого сплава с электролитом оптимальные параметры при нарезании резьбы в отверстиях сверхмалого диаметра при скорости резания 6 м/мин, концентрация раствора электролита 35 %; температура подаваемого электролита в зону резания 40°C; напряжение электрического тока 24 В.

Таким образом, сниженная скорость резания на 30–40 % по сравнению с обычной механической обработкой резьбовых отверстий сверхмалого диаметра, достаточная концентрация электролита, соответствующей температурой и напряжением способствуют значительному снижению крутящего момента на оси режущего инструмента.

обработки с электрохимической позволяет не только существенно повлиять на повышение качества поверхности, но и снизить технологические остаточные напряжения, а также способствовать восстановлению механических и физических свойств поверхности металлов после электроэрозивной обработки за счёт удаления микрослоя поверхности с приобретёнными термическими изменениями структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulikov, M.U. Technological method for the finishing process of fusible alloy Precision Machining / M.U. Kulikov, V.E. I nozemtsev, Myo Naing Oo // VII. Selected, peer reviewed papers from the 7th International Congress of Precision Machining (ICPM 2013), October 3-5, 2013, Miskolc, Hungary. pp. 224–228.
2. Куликов, М.Ю. Способ улучшения качества поверхностного слоя с помощью комбиниро-

ванной механо-электрохимической обработки / М.Ю. Куликов, В.Е.Иноземцев, Мо Наинг У.: сб. науч. тр. «Високи тенології в машинобудуванні» Харьковський політехнічний інститут. – 2012. – №1. – С. 168 – 170.

3. Иноземцев, В.Е. Использование и обработка металлокерамики / В.Е. Иноземцев // Мир транспорта». – 2010. – № 4. – С. 44 – 48.

4. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – С. 469–470, С. 494.
5. Афонин, А.Н. Прогрессивные машиностроительные технологии / А.Н. Афонин, Е.В. Гапоненко, О.Ю. Еренков [и др.]. – М.: Спектр, 2012. – С.191.
6. Иноземцев, В.Е. Факторы, влияющие на технологические возможности металлокерамических спечённых материалов, в процессе лезвийной чистовой обработки / В.Е. Иноземцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. - № 4/2 (288). - С. 61 – 66.
7. Иноземцев, В.Е. Исследование влияния условий чистовой механической обработки металлокерамических спечённых материалов на качество образуемой поверхности / В.Е. Иноземцев, М.Ю. Куликов: межвузовский сб. науч. тр. «Физика, химия и механика трибосистем» Ивановского государственного университета. Трибологический центр ИвГУ. Выпуск X. – Иваново, 2011. – С. 88–93.
8. Куликов, М.Ю. Исследования надёжности процесса резьбонарезания в отверстиях сверхмалого диаметра / М.Ю. Куликов, М.В. Ягодкин // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2015. – №5. – С.153–156.
9. Куликов, М.Ю. Особенности процесса резьбонарезания в отверстиях сверхмалых диаметров / М.Ю. Куликов, М.В. Ягодкин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – №3. – С.153–156.
10. Kulikov, M.U. The technological conception of quality assurance in the surface treatment of aluminum and copper alloys / M.U. Kulikov, V.E. Inozemtsev, D.A. Nechaev, Myo Naing Oo // Applied Mechanics and Materials Vols. 548–549. 2014 The 3rd International Conference on Manufacturing Engineering and Process (ICMEP 2014). April 10–11, 2014. Seoul, Korea. pp. 331–335.
11. Мо Наинг У. Снижение шероховатости поверхности деталей из алюминиевых сплавов путем комбинированного электромеханического способа обработки / Мо Наинг У // «Trans – Mech – Art – Chem»: тр. X Междунар. науч.–практ. конф. – М.: МИИТ, 2014.
12. Kulikov, M.Yu. Investigation of sots and amo impact upon thread-cutting reliability in ultra-small holes. / M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin, V.E. Inozemtsev // Bulletin of Bryansk state technical university. – 2018.- №4. – pp. 18–23.
13. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: под. ред. Б.И.Сашкина. – М.: Дрофа, 2002. – 656 с.
14. Куликов, М.Ю. Особенности процесса резьбонарезания в отверстиях сверхмалых диаметров / М.Ю. Куликов, М.В. Ягодкин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. - №3. – С.153–156.
1. Kulikov, M.U. Technological method for the finishing process of fusible alloy Precision Machining / M.U. Kulikov, V.E. I nozemtsev, Myo Naing Oo // VII. Selected, peer reviewed papers from the 7th International Congress of Precision Machining (ICPM 2013), October 3-5, 2013, Miskolc, Hungary. pp. 224–228.
2. Kulikov, M.Yu. Method for surface layer perfection by means of combined machining and electro-chemical treatment / M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, Myo Naing.: *Proceedings “High-Tech in Mechanical Engineering”*, Kharkov Polytechnic Institute. – 2012. – No.1. – pp. 168–170.
3. Inozemtsev, V.E. Metal ceramics use and processing / V.E. Inozemtsev // *World of Transport*. – 2010. – No.4. – pp. 44–48.
4. Poduraev, V.N. *Hard-to-Machine Material Cutting* / V.N. Poduraev. – М.: Higher School, 1974. – pp. 469-470, pp. 494.
5. Afonin, A.N. *Efficient Mechanical Engineering Technologies* / A.N. Afonin, E.V. Gaponenko, O.Yu. Yerenkov [et al.]. – М.: Spectrum, 2012. – pp. 191.
6. Inozemtsev, V.E. Factors influencing technological potentialities of metal ceramic sintered materials during edge finishing / V.E. Inozemtsev // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2011. – No.4/2(288). – pp. 61–66.
7. Inozemtsev, V.E. Investigation of finish machining impact of metal ceramic sintered materials upon quality of surface formed / V.E. Inozemtsev, M.Yu. Kulikov: *Inter-College Proceedings “Physics, Chemistry and Tribosystem Mechanics”*, Ivanovo State University. Tribological Center of IvSU. Issue X. – Ivanovo, 2011. – pp. 88–93.
8. Kulikov, M.Yu. Reliability research of thread cutting in super-small holes / M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin // *Proceedings of Kabardino-Balkaria State University*. – 2015. – No.5. – pp. 153-156.
9. Kulikov, M.Yu. Peculiarities of thread-cutting in super-small holes / M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No.3. – pp. 153–156.
10. Kulikov, M.U. The technological conception of quality assurance in the surface treatment of aluminum and copper alloys / M.U. Kulikov, V.E., Inozemtsev, D.A. Nechaev, Myo Naing Oo // Applied Mechanics and Materials Vols. 548–549. 2014 The 3rd International Conference on Manufacturing Engineering and Process (ICMEP 2014). April 10–11, 2014. Seoul, Korea. pp. 331–335.
11. Myo Naing U. Surface roughness decrease in aluminum alloy parts by means of combined electro-machining / Myo Naing U. // “Trans –

- Mech – Art – Chem”: Proceedings of the X-th Inter. Scientif.-Pract. Conf.* – М.: МИТ, 2014.
12. Kulikov, M.Yu. Investigation of sots and amo impact upon thread-cuttingreliability in ultra-small holes. / M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin, V.E. Inozemtsev //Bulletin of Bryansk state technical university. – 2018. – №4. – pp. 18–23.
13. *Physical-Chemical Methods of Processing in Gas Turbine Engine Production*: under the editorship of B.I. Sashkin. – М.: Drofa, 2002. – pp. 656.
14. Kulikov, M.Yu. Thread cutting peculiarities in super-small holes / M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No.3. – pp. 153–156.

Ссылка цитирования:

Иноземцев В.Е. Исследование применения совмещённых методов обработки медных и алюминиевых сплавов / В.Е. Иноземцев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. - № 11. – С. 26-35. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-26-35.

Статья поступила в редакцию 29.07.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Института материаловедения

Хабаровского научного центра

Дальневосточного отделения РАН

Химухин С.Н.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 27.10.20.

Сведения об авторах:

Иноземцев Виталий Евгеньевич, к.т.н., доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского

университета транспорта (МИИТ), науч. сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: vitalin-85@mail.ru.

Inozemtsev Vitaly Evgenievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Technology of Transport Mechanical Engineering and Rolling-Stock Repair”, Rus-

sian University of Transport (MIIT), Scientific assistant of Institute of Design-technological Informatics of RAS, e-mail: vitalin-85@mail.ru.