

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №11 (137). С. 8-15.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №11 (137). P. 8-15.

Научная статья
УДК 621.7.02
doi:10.30987/2223-4608-2022-11-8-15

Исследование процесса формирования поверхности при механо-электрохимической обработке сплавов на основе алюминия

Виталий Евгеньевич Иноземцев, к.т.н.
Институт конструкторско-технологической
информатики Российской академии наук (ИКИ РАН);
Российский университет транспорта (МИИТ)
vitalin-85@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4079-9115>

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований по обработке алюминиевых сплавов АК12 и АК7 совмещёнными методами формообразования, включающими как механическую токарную обработку, так и фрезерование, с наложением электрохимического воздействия на каждый из них. Исследованием подтверждается эффективность комбинированного воздействия на легкоплавкие труднообрабатываемые металлы и их сплавы.

Ключевые слова: алюминий, АК7, АК12, фрезерование, чистовая обработка, шероховатость, комбинированная обработка, параметры качества, режимы, СОТС

Для цитирования: Иноземцев В.Е. Исследование процесса формирования поверхности при механоэлектрохимической обработке сплавов на основе алюминия // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №11 (137). – С. 8-15. doi: 10.30987/2223-4608-2022-11-8-15.

Original article

Investigation of the process of surface formation during mechano-electrochemical processing of aluminum alloys

Vitaliy E. Inozemtcev, Can.Sc.Tech.
Institute for Design Technological Informatics
of Russian Academy of Sciences (IDTI RAS);
Russian University of Transport (MIIT)
vitalin-85@mail.ru

Abstract. This article discusses the results of experimental studies on the processing of aluminum alloys AS12 and AS7 by combined methods of shaping, including both mechanical turning and milling, with the imposition of an electrochemical effect on each of them. The study confirms the effectiveness of the combined effect on low-melting, hard-to-cut metals and their alloys.

Keywords: aluminum, AS7, AS12, milling, finishing, roughness, combined machining, quality parameters, modes, cutting fluid

For citation: Inozemtcev V.E. Investigation of the process of surface formation during mechano-electrochemical processing of aluminum alloys. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 11 (137), pp. 8-15. doi: 10.30987/2223-4608-2022-11-8-15.

Введение

В настоящее время известна уже доказанная высокая эффективность использования технологических операций комбинированных типов, именно такой технологический подход

позволяет широко варьировать значения входных параметров процесса формообразования и контролировать критерии качества. Однако слишком большое разнообразие технологических параметров, играющих значительную роль в формировании шероховатости поверхности

деталей при их обработке, затрудняет определение оптимальных значений входных факторов при их взаимодействии в условиях процесса обработки. В связи с этим в настоящее время большое внимание уделяется различным комбинациям обработки алюминия и его сплавов, включая механическую финишную обработку с совмещением действия электрического тока, а также с различными смазочно-охлаждающими технологическими средами с химической активацией, а также снижению интенсивности нежелательных динамических и тепловых воздействий на технологическую систему и процессы формообразования в современных условиях производства.

Особенности обработки пластичных металлов

Существуют различные методы обработки металлов и их сплавов, но вопросы обеспечения качества поверхности деталей машин актуальны и сегодня. Во многом проблема обусловлена всё более жёсткими требованиями к качеству продукции, предъявляемыми в последнее время, а также связана с некоторыми дополнительными требованиями или обязательными условиями к поверхности и структуре изготавливаемых деталей, что регламентировано функциональностью и специфичностью современных комплексных технологий и оборудования.

В то же время, до сих пор наибольшая часть всех технологических операций, связанных с формообразованием, приходится на механическую обработку, а фрезерование представляет значительную долю всей механической обработки.

По критерию достижения шероховатости алюминий и его сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам. Значительная шероховатость поверхности этих материалов после обработки обусловлена их ключевыми механическими свойствами: высокой ударной вязкостью и пластичностью, вызывающих формирование элементной стружки при резании, а также значительному удлинению металлических зерен в направлении схода стружки и вибрационными характеристиками самой технологической системы. С практической точки зрения этот вопрос был разрешён за счет увеличения скорости резания и выбором наиболее оптимальных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) [1].

При чистовом фрезеровании как глубина резания (порядка 0,25...0,5 мм), так и подача на зуб (примерно 0,05...0,15 мм/зуб) ниже. По-

скольку станок не требует такой большой мощности, как для фрезерования при снятии чернового припуска, то возможно использовать торцевые фрезы с мелким шагом режущих пластин. Увеличенное количество режущих пластин позволяет выполнять обработку с большей подачей стола в минуту, хотя подача на зуб фрезы не будет большой. При этом нет проблем с размещением стружки из-за небольших глубин врезания инструмента. Комплексная механоэлектрохимическая обработка позволяет эффективно повышать качество поверхности при обработке деталей из алюминия, а также алюминиевых сплавов [2]. При фрезеровании (в отличие от точения) необходимо учитывать совершенно другой характер взаимодействия кромок инструмента и поверхности обрабатываемой детали, а также участие в процессе обработки нескольких режущих кромок, из-за чего возможно увеличение шероховатости на макроуровне.

В настоящее время высокопрочные алюминиевые сплавы обрабатываются твердосплавными инструментами на скоростях в диапазоне 1000...3000 м/мин. При исследовании эффективности технологии фрезерования [3] было установлено, что нет тесной взаимосвязи между шероховатостью и режимными параметрами процесса. Также преимущественное влияние на шероховатость оказывают параметры применяемого технологического оборудования: мощность, жёсткость, допустимый крутящий момент на шпинделе. Кроме того, с учетом требований, предъявляемых к оборудованию при фрезеровании алюминиевых сплавов, шероховатость обрабатываемой поверхности может находиться в диапазоне Ra 0,6...0,8 мкм.

Жёсткость и точность позиционирования технологического оборудования, используемого при операциях, имеют большое значение для качества формирования поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов. Сейчас параметры качества в основном обеспечиваются использованием современных высокопроизводительных станков с числовым программным управлением, это оборудование позволяет проводить высокоскоростную обработку HSM (High Speed Machining). Основной особенностью здесь выступают высокие скорости резания, при которых значительно повышается температура в зоне стружкообразования, материал заготовки становится мягче, а силы резания снижаются, что позволяет инструменту перемещаться с большой подачей при резании.

Достижение эффекта HSM возможно из-за структурных изменений в металле в зоне отде-

ления стружки. Это связано с образованием пластических деформаций, динамика которых развивается с большой скоростью. С увеличением скорости деформации силы резания вначале увеличиваются, а затем, при достижении определенной температуры в зоне образования стружки, они начинают значительно уменьшаться. В то же время длительность контакта режущей кромки с заготовкой и стружкой настолько короткое, а скорость удаления стружки настолько высока, что большая часть тепла, выделяемого в зоне резания, отводится вместе со стружкой, а заготовка и инструмент не успевают значительно нагреться.

Данный эффект уже был известен ранее. Основываясь на многочисленных исследованиях процессов механической обработки и HSM-программирования, специалисты [4] разработали основные рекомендации, касающиеся режимов резания, выбора станочного оборудования, а также выбора режущего инструмента и его позиционирования.

Одновременно с этим отдельно отмечается преимущество применения механоэлектрохимической обработки [5], благодаря которой возможно получать детали с высококачественными поверхностями и при этом обеспечивать высокую производительность и износостойкость инструмента. Однако механоэлектрохимическое формообразование, обеспечиваемое фрезерованием ещё не получило широкого применения.

Также известно [4, 5], что при чистовых операциях за счёт такой комплексной обработки наиболее эффективными считаются схемы обработки, которые включают последовательное воздействие механической и электрохимической функциональности. Этот способ обработки основан на сочетании электрического контактного взаимодействия между инструментом и обрабатываемой деталью (механическое разрушение или придание формы металлическим поверхностям, осуществляемое одновременно с нагревом или плавлением этих поверхностей электротоком и растворения металла на обрабатываемой поверхности за счёт катодно-анодных процессов).

Сам инструмент и обеспечивает токоподвод, одновременно удаляя размягчающийся металл, и одновременно из-за вибрации способствует образованию множества прерывистых контактов, которые необходимы для формирования дуговых разрядов [6, 7]. Электроконтактное резание реализуется как на воздухе, так и в жидкой среде. Производительность обра-

ботки увеличивается почти линейно с возрастанием напряжения и мощности источника питания.

Влияющие факторы

Значительную роль в качестве формируемой поверхности при комбинированном фрезеровании алюминия и его сплавов играют: вид обрабатываемого металла, материал режущего инструмента (в данном случае фрезы), количество зубьев фрезы, условия резания, геометрические параметры и точность позиционирования используемых сменных режущих пластин фрезы, взаимное положение фрезы по отношению к заготовке (симметричное/асимметричное фрезерование), направление движения фрезы (встречное или попутное), интенсивность наростообразования на режущей кромке, ток и напряжение в зоне контакта инструмента и заготовки, условия резания, связанные с применением смазочно-охлаждающей технологической среды, которая может выполнять роль электролита, способ подачи СОТС. Следовательно, механоэлектрохимическая обработка позволяет контролировать качество формообразования и влиять на оптимизацию технологического процесса, благодаря обширному диапазону варьируемых факторов.

Также необходимо учитывать и вредные факторы, негативно влияющие на процесс формообразования, такие как вибрация, обусловленная спецификой и особенностями технологической системы, а также самовозбуждающиеся колебания обрабатываемой заготовки [8]. Для станка его жёсткость и демпфирование являются двумя важными факторами, определяющими динамические характеристики. Для устойчивой системы колебания со временем затухают.

Жёсткость системы зависит от размеров и жёсткости конструкции, а демпфирование зависит от типа материала, используемого в качестве обрабатываемого, а также количество/характер соединений в технологической системе. Обработка резанием генерирует два основных типа вибраций.

Вынужденные колебания обычно вызываются периодическими силами, присутствующими в станке, такие как дисбаланс вращающихся масс, внешние возбуждения, возможные из-за периодических контактных взаимодействий с заготовкой при её обработке. Самовозбуждающаяся вибрация (дребезжание) вызвана взаимодействиями в процессе удаления стружки и конструкцией режущего инструмента.

Вибрации могут привести к потере требуемой точности размеров и производительности, а также отрицательно влияют на срок службы инструмента, шероховатость поверхности и, следовательно, соотношение затрат к производительности. Эти эффекты еще более выражены, если частота любого компонента в пределах системы станок-заготовка приближаются к их соответствующим собственным частотам.

Некоторые из рекомендаций по снижению вибрации: применение по возможности стандартной оснастки и приспособлений, обладающих более жесткой конструкцией и более высокой демпфирующей способностью; использование инструментов с нечётным числом зубьев; правильное базирование заготовки; минимальный вылет для заготовок и т.д.

Материалы и методы

Проведение экспериментальных исследований с фрезерованием. Эксперименты по фрезерованию пластин из сплава АК7 с раз-

личными условиями обработки продемонстрировали возможности варьирования входных параметров за счёт изменения условий резания и за счёт наложения электрического поля постоянного тока с разными условиями полярности подключения заготовки и режущего инструмента.

Водные растворы NaCl, кальцинированной соды Na₂CO₃ (с концентрацией 5 % на 1 л), раствор Cu₂SO₄ выполняли роль и электролитов и роль СОТС. Обработка фрезерованием осуществлялась на низких скоростях резания 42 м/мин и 60 м/мин из-за ограниченных технических характеристик оборудования. При этом использовалась 3-зубая концевая фреза диаметром 12 мм из Т5К10. Подача составляла 25 мм/мин, глубина резания составляла 0,5 мм. При скорости резания 42 м/мин шероховатость комбинированной обработки *Ra* наблюдалась порядка 0,30 мкм. Электролитом выступал раствор Na₂CO₃. Основные результаты фрезерования приведены в табл. 1.

1. Шероховатость после механоэлектрохимического фрезерования АК7

№	Условия обработки	Скорость резания <i>v</i> , м/мин	Ток и напряжение в цепи, (А; В)	Шероховатость <i>Ra</i> , мкм	
1	Сухое резание		-	0,46; 0,49; 0,44	
2	Сухое резание с электрическим током (двухполярное подключение)	42	1 А 20 В	0,43; 0,51; 0,53	
3	Сухое резание с электрическим током (однополярное подключение)		1 А 20 В	0,44; 0,41; 0,49	
4	с NaCl		-	0,31; 0,32; 0,36	
5	с Na ₂ CO ₃		-	0,31; 0,32; 0,35	
6	с Cu ₂ SO ₄		-	0,36; 0,41; 0,44	
7	Резание с электрическим током (двухполярное подключение) с NaCl		1...1,5 А 20...25 В	0,37; 0,43; 0,47	
8	Резание с электрическим током (двухполярное подключение) с Na ₂ CO ₃		0,5 А 4 В	0,30; 0,31; 0,36	
9	Резание с электрическим током (двухполярное подключение) с Cu ₂ SO ₄		1,5 А 25 В	0,37; 0,39; 0,40	
10	Резание с прямой и обратной подачей с электрическим током (двухполярное подключение) с NaCl		60	0,5...1 А 10...15 В	0,6; 0,68; 0,71; 0,65
11	Резание с прямой и обратной подачей с электрическим током (двухполярное подключение) с Na ₂ CO ₃			0,5...1 А 10...15 В	0,28; 0,27; 0,35; 0,33
12	Резание с прямой и обратной подачей с электрическим током (двухполярное подключение) с Al ₂ (SO ₄) ₂	1 А 10...15 В		0,55; 0,57; 0,61; 0,59	
13	Сухое резание с прямой и обратной подачей	----		0,75; 0,72; 0,77; 0,74	
14	Сухое резание с прямой и обратной подачей с электрическим током	0,5 А 8...10 В		0,64; 0,68; 0,73; 0,71	

Выводы по механоэлектрохимической обработке (при фрезеровании). Как показали результаты, фрезерование алюминиевого сплава АК7 без СОТС позволяет получать $Ra = 0,26...0,34$ мкм. В то же время обработка АК7 с электрическим током и водным раствором соли NaCl позволяет получить $Ra = 0,35...0,42$ мкм. В то же время произошло незначительное снижение тока (до 0,3 А) и напряжения в цепи (до 4 В). Некоторые отдельные эксперименты проводились с использованием обратной подачи концевой фрезы – она проходила тот же путь и в прямом и в обратном направлении (двойной рабочий ход). Это в какой-то степени снижало шероховатость поверхности, но значительного эффекта не было.

К сожалению, такие режимы резания при фрезеровании создают благоприятные условия для образования наростов на передней поверхности режущих пластин, что уменьшает передний угол и снижает точность обработки, хотя улучшается отвод тепла из-за увеличения площади контакта. Также повышается электропроводимость между инструментом и обрабатываемой деталью. Наилучшим вариантом можно считать обеспечение возможностей тонкого фрезерования алюминия с глубиной резания и подачей, которые способствуют минимальному образованию наростов, не деформируя и не уплотняя поверхностные слои, а лишь удаляя заложённый припуск.

В качестве основных общих рекомендаций по обеспечению наиболее лучших параметров качества поверхности, включая рекомендованные другими исследованиями [9], можно отметить следующее: спиральный профиль зуба обеспечивает лучшую обработку, более равномерное распределение нагрузки и меньшую вибрацию по сравнению с профилем зуба с прямыми краями; рекомендуются увеличенные передний и задний углы, что приводит к уменьшению силы резания и, следовательно, шероховатости; шпиндель можно слегка наклонить в направлении подачи, чтобы обработанная поверхность не обрабатывалась задней стороной фрезы из-за незначительного изгиба оси шпинделя; важно сохранять рекомендованные направление резания, глубины резания и соответствующие типы режущих кромок операций, требующих фрезерование чистовых проходов; использовать большое количество СОТС; очищать поверхность заготовки перед обработкой; поддерживать острые режущие

кромки, чтобы инструмент срезал материал, а не сминал его; важно выбирать геометрию инструмента, при которой стружка будет подниматься вверх и наружу от обработанной поверхности.

Проведение экспериментальных исследований при точении. При проведении экспериментальных исследований рассматривался алюминий марки АК12 (АЛ2). Подача электролита обеспечивалась таким образом, чтобы охватить зону контакта инструмента и заготовки, включая участок поверхности после зоны контакта. Время на лезвийную и механоэлектрохимическую обработку при этом ограничено режимами чистовой механической обработки и длиной участка поверхности обрабатываемой заготовки.

Качество обработки зависит от ключевых параметров: скорость резания $v = 100...350$ м/мин; подача инструмента $s = 0,05$ мм/об; радиус при вершине резца $r = 0,4$ мм; глубина резания $t = 0,5$ мм; концентрация применяемого электролита – 20...40 %; значения тока и напряжения в цепи $I = 1,3...2,4$ А, $U = 12...24$ В; передний $\gamma = 7^\circ$ и задний $\alpha = 8^\circ$ углы режущего инструмента.

Установлено, что изменение заднего и переднего угла в рекомендуемых пределах не оказывает существенного влияния на шероховатость обработанной поверхности. В процессе исследований допускалось варьирование некоторых из основных факторов – рабочее напряжение U , скорость резания v , концентрация применяемого электролита. Остальные из наиболее существенных не изменялись и были приняты за константу. При исследовании снижения шероховатости обработанной поверхности АК12, рассматривается изменение напряжения, скорости резания и концентрации электролита. Все экспериментальные данные были достигнуты при значениях напряжения, скорости резания и концентрация раствора, которые изменялись соответственно в диапазонах 12...24В, 150...250 м/мин и 20...40% хлорида натрия с добавлением 2 % - ного нитрата натрия (табл. 2).

Практические исследования показали, что в результате обработки силумина с применением электрической активации СОТС более результативное совместное влияние рассматриваемых факторов на шероховатость поверхности наблюдается при скорости 250 м/мин; концентра-

ции раствора электролита 30 %; напряжении электрического тока 24 В.

Таким образом, наибольшая в рекомендованном диапазоне для обработки пластичных металлов скорость резания, достаточная кон-

центрация электролита, напряжение, необходимое для эффективной активации СОТС способствуют значительному снижению шероховатости алюминия при операциях чистой обработки (рис. 1-3).

Результаты механоэлектрохимической обработки АК12 при течении

NaCl – 20% + NaNO ₃ – 2%			
Напряжение, В	Скорость, м/мин	Шероховатость <i>Ra</i> , мкм	Шероховатость <i>Ra</i> , мкм
12	150	0,71/0,74/0,75/0,75/ 0,68/0,72/0,69/0,7	0,72
	200	0,7/0,69/0,7/0,68 0,68/0,7/0,67/0,68	0,69
	250	0,68/0,65/0,64/0,66 0,66/0,69/0,7/0,67	0,67
18	150	0,7/0,67/0,66/0,67 0,72/0,69/0,67/0,68	0,69
	200	0,64/0,65/0,68/0,67 0,72/0,7/0,65/0,7	0,67
	250	0,61/0,64/0,66/0,65 0,62/0,65/0,62/0,67	0,65
24	150	0,68/0,63/0,65/0,63 0,67/0,64/0,67/0,68	0,66
	200	0,6/0,64/0,66/0,65 0,61/0,66/0,65/0,63	0,63
	250	0,59/0,63/0,61/0,64 0,6/0,64/0,63/0,64	0,62

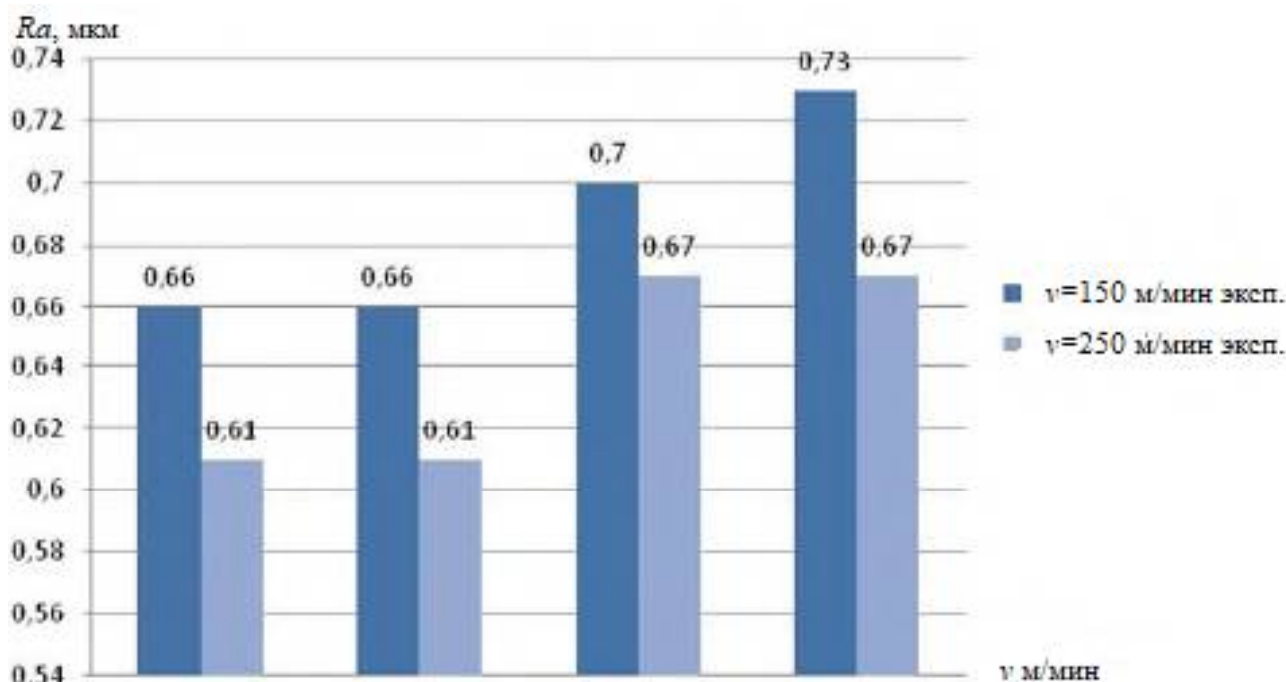


Рис. 1. Влияние скорости резания на изменение шероховатости поверхности

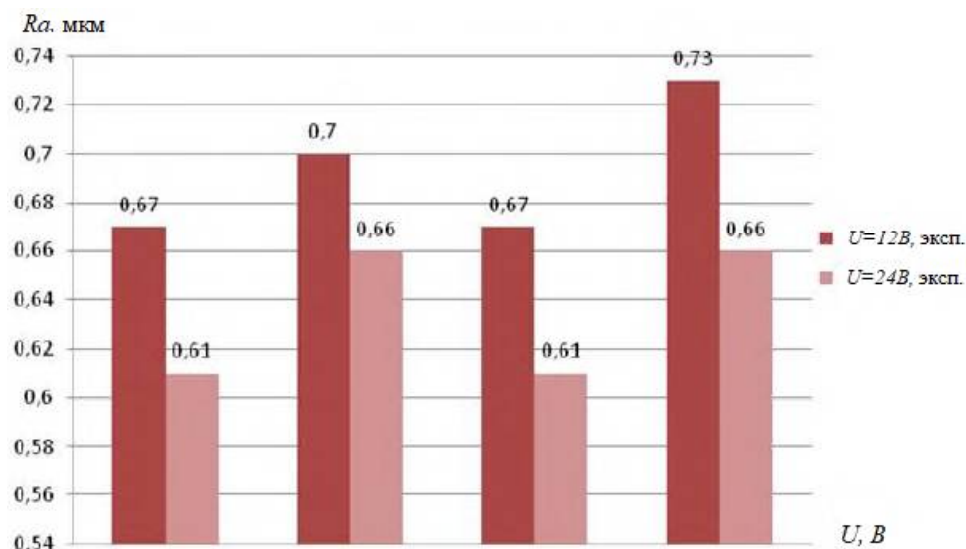


Рис. 2. Влияние напряжения на изменение шероховатости

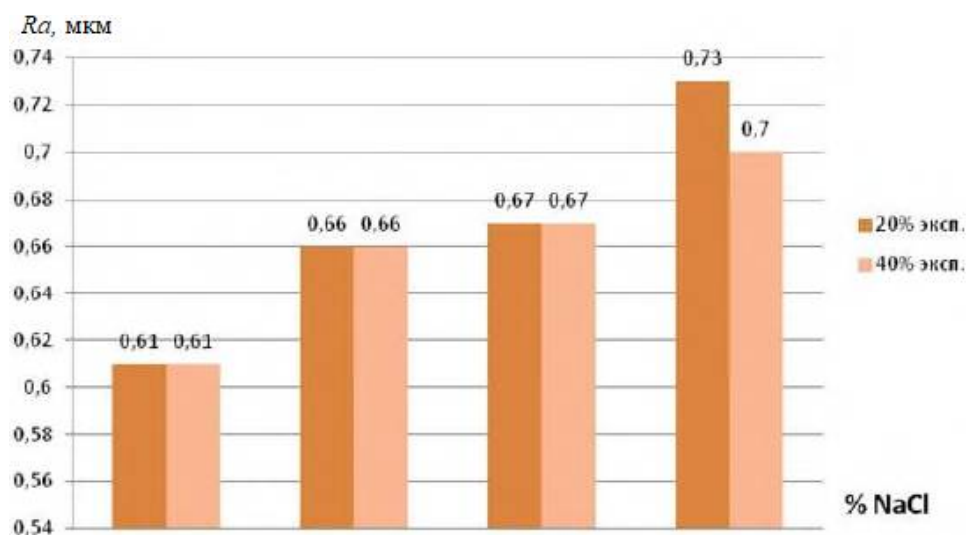


Рис. 3. Влияние изменения концентрации раствора на изменение шероховатости

Выводы по механоэлектрохимической обработке (при точении). В результате экспериментальных исследований после механоэлектрохимической обработки АК12 в 30 %-ном растворе NaCl, с добавлением 2 %-ного NaNO₃ получена шероховатость Ra до 0,60 мкм. При всех поставленных выше экспериментах по точению рассматривался режущий твёрдосплавный инструмент с радиусом вершины 0,4 мм, скорость резания оставляла 250 м/мин, напряжение 24 В.

Таким образом, наибольшее, по сравнению с традиционным точением, снижение шероховатости достигается при механоэлектрохимической обработке за счёт сочетания следующих входящих факторов: инструмент из твёрдого сплава с соответствующей рекомендованной геометрией и параметрами для обработки пластичных металлов и их сплавов; напряже-

ние, достаточное для электрохимической активации СОТС; наибольшие скорости резания из рекомендованного диапазона для обработки пластичных металлов; применение вместо СОТС электролита (NaCl 30 % и NaNO₃ 2 %).

Заключение

В настоящее время продолжают исследования возможностей комбинированных методов обработки, включая совмещение электрохимической активации СОТС с фрезерованием для обеспечения качества поверхности за счёт двойного хода инструмента, с лезвийной обработкой точением с совмещением воздействия электрического тока и токопроводящего состава СОТС, а также в условиях сухого резания с наложением электрического поля постоянного и переменного тока. Решение задач, связанных с оптимизацией комплексного влияния и взаи-

модействия факторов, обусловленных физико-химическими и физико-механическими процессами, а также факторов, обусловленных динамическими колебаниями технологической системы, при механоэлектрохимической обработке способствует существенному повышению возможностей в получении поверхностей требуемого качества. Также при рациональном подходе к достижению качества в процессе обработки возможно способствовать снижению внутренних остаточных напряжений в поверхностном слое деталей без применения дополнительных операций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бреев, С.В., Серебrenникова, А.Г. Высокооборотное фрезерование труднообрабатываемых материалов. Особенности обрабатываемости при фрезеровании // Научные записки. IV-1(16). 2013. – С. 59-66.
2. Куликов М.Ю., Иноземцев, В.Е., Нечаев, Д.А. Совершенствование способа финишной анодно-механической обработки цветных металлов и их сплавов // Научно-технические технологии в машиностроении 2014/11. – С. 19-22.
3. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
4. Интерактивный каталог режущего инструмента http://www.goodtool.ru/obr_mat/al.htm
5. Грубый, С.В., Зайцев, А.М. Повышение эффективности технологии фрезерования деталей из перспективных алюминиевых сплавов на современном оборудовании с ЧПУ // Наука и образование. ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Эл. ФС № 77 – 48211. 12/2013.
6. Степанов, А.В. Высокооборотное фрезерование в современном производстве. CAD/CAM/CAE Observer

4 (13) 2003. Электронное издание.

7. Валетов, В.А., Мурашко, В.Б. Основы приборостроения. Санкт-Петербург - 180 с.
8. Kalpakjian, S. (1997) Manufacturing Process for Engineering Materials. 3rd ed., Addison-Wesley, Menlo Park, CA. ISBN 0-201-82370-5.
9. Jain, R.K. (2000) Production Technology, 15th ed., Khanna Publishers, Delhi. P. 62-67.

REFERENCES

1. Breev, S.V., Serebrennikova, A.G. High-speed milling of difficult-to-machine materials. Features of machinability during milling // Scientific notes. IV-1(16). 2013. - PP. 59-66.
2. Kulikov, M.Yu., Inozemtsev, V.E., Nechaev, D.A. Improving the method of finishing anode-mechanical processing of non-ferrous metals and their alloys // Science-intensive technologies in mechanical engineering 2014/11. - PP. 19-22.
3. Suslov, A.G. The quality of the surface layer of machine parts. - M.: Mashinostroyeniye, 2000. - 320 p.
4. Interactive catalog of cutting tools http://www.goodtool.ru/obr_mat/al.htm
5. Gruby, S.V., Zaitsev, A.M. Improving the efficiency of milling technology for parts from advanced aluminum alloys using modern CNC equipment. Nauka i obrazovanie. FGBOU VPO «MSTU im. N.E. Bauman». Email FS No. 77-48211. 12/2013.
6. Stepanov, A.V. High-speed milling in modern production. CAD/CAM/CAE Observer 4 (13) 2003. Electronic edition.
7. Valetov, V.A., Murashko, V.B. Fundamentals of instrumentation. St. Petersburg, 2006. - 180 p.
8. Kalpakjian, S. (1997) Manufacturing Process for Engineering Materials. 3rd ed., Addison-Wesley, Menlo Park, CA. ISBN 0-201-82370-5.
9. Jain, R.K. (2000) Production Technology, 15th ed., Khanna Publishers, Delhi. P. 62-67.

Статья поступила в редакцию 29.06.2022; одобрена после рецензирования 08.07.2022; принята к публикации 14.07.2022.

The article was submitted 29.06.2022; approved after reviewing 08.07.2022; assepted for publication 14.07.2022.

