



Прогрессивные способы финишной обработки деталей подвижного состава



Дмитрий ЕВСЕЕВ
Dmitry G. EVSEEV

Михаил КУЛИКОВ
Mikhail Yu. KULIKOV



Виталий ИНОЗЕМЦЕВ
Vitaly E. INOZEMTSEV

Евсеев Дмитрий Геннадиевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Куликов Михаил Юрьевич — доктор технических наук, профессор МИИТ, Москва, Россия.
Иноземцев Виталий Евгеньевич — кандидат технических наук, ст. преподаватель МИИТ, Москва, Россия.

Innovative Ways of Finishing of Rolling Stock Assembly Parts

(текст статьи на англ. яз. —
English text of the article — p. 46)

Разработан способ обеспечения качества поверхности деталей из цветных металлов и их сплавов. Определена схема установки под необходимые условия процесса их обработки, рассчитанного на сочетание механического и анодного воздействия на поверхность заготовки. Комплексная технология позволяет достигать предусмотренных качественных характеристик и широко варьировать параметры как при операциях точения, так и фрезерования деталей транспортных агрегатов, узлов и машин.

Ключевые слова: транспортные машины, обработка деталей, алюминий, силумины, точение, фрезерование, параметры качества, шероховатость, электролит, скорость резания.

Применение высокотехнологичных материалов позволяет обеспечить требуемый уровень качества машиностроительной продукции. Технологии производства материалов помогают создавать в большинстве случаев уже готовые детали без дополнительных операций формообразования. Отдельные категории металлоизделий получают, применяя чистовую механическую обработку. Поэтому проблемы, сопутствующие подобным операциям, очень актуальны и требуют индивидуального подхода к их решению.

Обработка цветных металлов и их сплавов — из этого разряда, и она требует нетривиальных решений и технологических подходов. Известно, что широкое применение, к примеру, алюминия и его сплавов на железнодорожном транспорте есть результат усилий, направленных на снижение осевой нагрузки, такие материалы обладают всеми физико-механическими конструкционными свойствами и не подвержены коррозии; кроме того, многие алюминиевые сплавы хорошо поддаются

сварке. Впрочем, их механическая обработка затруднена при низкой шероховатости поверхности деталей и заготовок.

1.

Экспериментально подтверждено, что эффективным способом для получения требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей из цветных и пористых металлокерамических материалов является лезвийная анодно-механическая обработка (АМО) [1].

Лезвийная АМО при точении представляет сочетание методов удаления основной части припуска металла механическим способом и одновременно анодного растворения металла обрабатываемой поверхности. Шероховатость получаемой поверхности зависит от режимов механической обработки, формирующей предварительную структуру поверхностного слоя, выступающей базовой для анодного процесса обработки. Чем лучше шероховатость поверхности в результате лезвийной обработки, тем эффективнее сказывается действие анодной обработки при достижении окончательных параметров шероховатости [2].

В ходе лезвийной АМО возможны различные сочетания механической и электрохимической составляющих, которые реализуются с помощью схем введения электрического тока в зону резания. В наших исследованиях определена наиболее эффективная электрическая схема, позволяющая достичь наименьшей шероховатости поверхности из медных и алюминиевых сплавов.

Исходя из анализа источников [1, 2], при обработке деталей варьировались следующие факторы: рабочее напряжение — U , В (12–24 В), скорость резания — V , м/мин (100–350 м/мин), концентрация применяемого электролита — ω , % (20–40). Остальные факторы фиксируются и остаются постоянными.

Исследования проводились с применением трёх схем с различными типами подключения электродов (рис. 1). Во всех случаях положительный заряд электрического тока подводился на обрабатываемую деталь. В каждой из схем варьировалось положение второго отрицательного электрода. В 1-й схеме такой электрод подводился непосредственно к резцу.

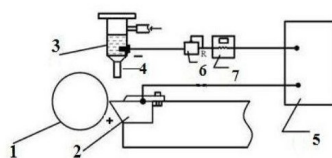


Схема 1

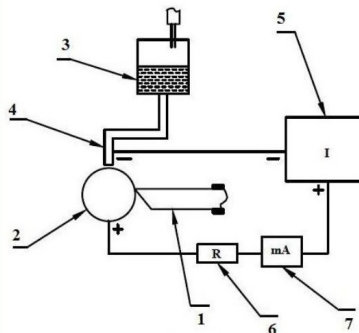


Схема 2

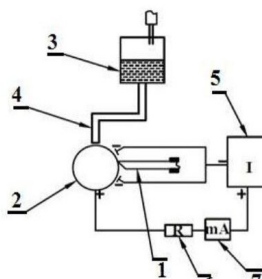


Схема 3

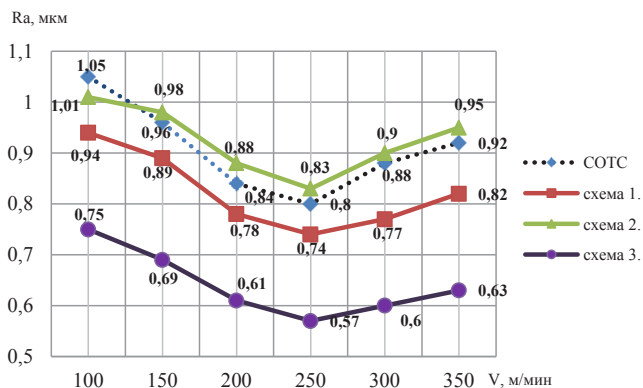
Рис. 1. Принципиальные схемы установок для проведения анодно-механической обработки:
1 – режущий инструмент; 2 – заготовка;
3 – электролит; 4 – металлическая трубка;
5 – источник питания; 6 – переменный резистор;
7 – микроамперметр.

Во 2-й — в ёмкость с электролитом. В 3-й — к зоне резания на расстояние 0,1–0,5 мм от обрабатываемой детали.

Как показали результаты исследований (рис. 2), в процессе резания силуминов при лезвийной АМО наименьшая шероховатость достигается при использовании схемы 3, в которой после резания происходит анодное растворение обрабатываемой поверхности. Известно, что образование окислов на обрабатываемой поверхности значительно снижает показатели электрохимической обработки. Особенно это значимо при анодном растворении алюминиевых сплавов, имеющих высокую способность к окислению [3]. Применение именно этой схемы позволяет получить наименьшую шероховатость поверхности в процессе лезвийной АМО. В данном



Рис. 2. Сравнительные результаты шероховатости обработанной поверхности, полученные при резаниях с разными электрическими схемами.



случае основной припуск удаляется лезвийным инструментом, оставшийся припуск удаляется после анодного растворения и окончательный микрорельеф формируется в ходе электрохимической обработки.

2.

Дальнейшие исследования проводились при использовании схемы 3. Известно большое влияние состава электролита на показатели электрохимической обработки [3]. В качестве электролита выступали водные растворы — хлорида натрия и нитрата натрия. Как показали результаты (рис. 4), наиболее эффективным зарекомендовал себя водный раствор хлорида натрия. Процесс обработки проходит с большей отдачей при концентрации раствора около 25–30%. Увеличение его концентрации до более высокого уровня ухудшает шероховатость обработанной поверхности, увеличивает вязкость раствора электролита [3, 4], что приводит к уменьшению производительности процесса анодного растворения.

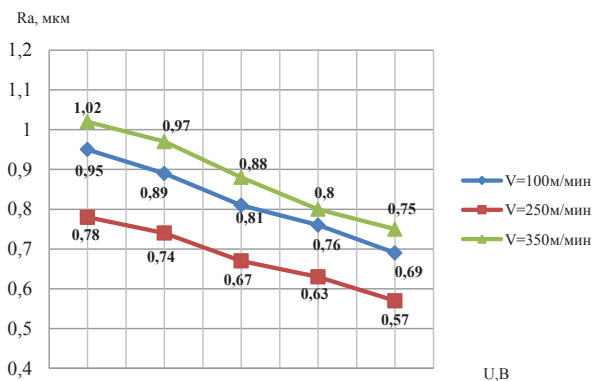
Изменение напряжения в электрической цепи при лезвийной АМО также влияет на шероховатость обработанной

поверхности. По ходу исследований напряжение в цепи варьировалось в диапазоне 12–24 В. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к пробоев в межэлектродном зазоре. Тем не менее из результатов экспериментов следует (рис. 3), что рост напряжения в цепи положительно влияет на качество шероховатости.

Большое содержание алюминия в образцах силуминов (около 87%) способствует увеличению скорости процесса анодного растворения при лезвийной АМО. Поэтому обработка осуществлялась на высоких скоростях при использовании таких условий травления, которые позволяют снизить уровень шероховатости. Исследования показали (рис. 2), что минимальная шероховатость обработанной поверхности силуминов достигается при скоростях резания в диапазоне от 200 до 300 м/мин.

В результате экспериментальных исследований формирования качества поверхности при обработке силуминов установлено, что шероховатость обработанной поверхности достигает $Ra < 0,60$ мкм при лезвийной АМО с использованием 30%-го водного раствора NaCl, при скорости ре-

Рис. 3. Влияние напряжения электрической цепи на шероховатость поверхности при обработке силуминов.



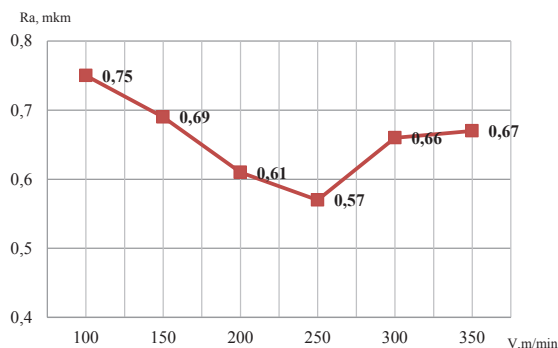


Рис. 4. Влияние концентрации электролита на шероховатость обработанной поверхности силуминов.

зания 250 м/мин и напряжении электрической цепи 24 В.

Формирование шероховатости обработанной поверхности силуминов при использовании 3-й электрической схемы лезвийной АМО состоит из двух последовательных этапов: снятия припуска с помощью лезвийной механической обработки и последующего анодного растворения металла поверхности, вышедшей из-под инструмента. Разработанная ранее математическая модель формирования шероховатости обработанной поверхности [5] при лезвийной АМО силуминов и с учётом характера процесса приобретает следующий вид:

$$Rz = h1 + h2 + h3 + h4 - h5, \quad (1)$$

где Rz — средняя высота профиля шероховатости;

$h1$ — составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента;

$h2$ — составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности;

$h3$ — составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки;

$h4$ — составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента;

$h5$ — величина изменения профиля шероховатости, обусловленная анодным растворением при лезвийной АМО.

В результате статистической обработки экспериментальных данных модель формирования шероховатости обработанной поверхности для лезвийной АМО получает вид:

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

где Ra — показатель шероховатости (мкм); V — скорость резания (м/мин); ω — концентрация электролита (%); U — значение напряжения (В).

3.

Была проведена и оптимизация условий формирования шероховатости обработанной поверхности силуминов при развёртывании и резьбонарезании методом АМО. Принцип действия в этих операциях со сплавами несущественно отличается от лезвийной АМО точением. Особенность подобных процессов заключается в ином взаимодействии режущего инструмента с поверхностью заготовки. При развёртывании и резьбонарезании кромка режущей части инструмента позволяет получить основные геометрические параметры, а последующий процесс анодного растворения формирует окончательные геометрические параметры обработанной поверхности.

В результате получаем математическую модель уменьшения шероховатости поверхности при лезвийной обработке и АМО при развёртывании:

$$Ra = \frac{e^{0,1545} \cdot \omega^{0,039}}{V^{0,03} \cdot U^{0,35}}. \quad (3)$$

После соответствующих расчётов и преобразований математическая модель уменьшения шероховатости поверхности при лезвийной АМО на этапе резьбонарезания приобретает следующий вид:

$$Ra = \frac{e^{8,39} \cdot \omega^{0,66}}{V^{0,72} \cdot U^{3,86}}. \quad (4)$$

Оптимальные условия резания при развёртывании и резьбонарезании:



$V = 20$ м/мин, $U = 24$ В, 30% хлорида натрия с добавлением 2% нитрида натрия (шероховатость при развёртывании составила $Ra\ 0,51$ мкм, при резьбонарезании — $Ra\ 0,21$ мкм).

При чистовой обработке алюминиевых сплавов рекомендуемая скорость резания — 400–500 м/мин [6]. Как показали исследования, при АМО оптимальной является скорость 250 м/мин. Проведенные стойкостные испытания свидетельствуют о том, что снижение скорости резания при чистовой обработке алюминиевых сплавов позволяет уменьшить интенсивность размерного износа в 1,5–3 раза при значительно меньшей шероховатости обработанной поверхности (снижение более чем в два раза).

Исходя из этого преимуществом чистовой лезвийной АМО силуминов по сравнению с традиционным точением считается более низкая шероховатость обработанной поверхности ($Ra\ 0,6$ мкм против 1,3 мкм) при значительно более низкой (в 1,5–3 раза) интенсивности размерного износа инструмента, достигаемой за счет снижения скорости резания. При использовании традиционного чистового точения минимальная шероховатость Ra составляет 1,25–1,3 мкм. Поэтому для достижения шероховатости $Ra\ 0,6$ мкм в этом случае необходимо вводить дополнительные технологические операции финишной обработки, которые заметно увеличивают трудоёмкость всего процесса механической обработки деталей из силуминов.

Исследование формирования качества поверхности деталей из алюминия и алюминиевых сплавов в процессе фрезерования также подтверждает целесообразность применения АМО. Закономерность формообразования при этом тоже описывается формулой (1), но в данном случае надо учитывать еще и иной характер взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью, наличие нескольких режущих кромок, что может способствовать росту шероховатости на макроуровне. В ходе изучения технологии фрезерной обработки [7] установлено, что отсутствует какая-либо тесная взаимосвязь между шероховатостью и режимными параметрами обработки. Преобладающее влияние на шероховатость оказывают параметры оборудования: допустимый крутящий мо-

мент на шпинделе, мощность, жесткость. При соблюдении установленных требований к оборудованию в процессе фрезерования алюминиевых сплавов шероховатость обработанной поверхности может находиться в пределах $Ra\ 0,6$ – $0,8$ мкм.

Большое влияние на качество формирования поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов оказывает жесткость и точность позиционирования применяемого технологического оборудования. В настоящее время параметры качества обеспечиваются при наличии современных высокопроизводительных станков с числовым программным управлением, позволяющих осуществлять высокоскоростную механообработку HSM (High Speed Machining). Её отличительной особенностью является высокая скорость резания, при которой значительно увеличивается температура в зоне образования стружки, материал обрабатываемой детали становится мягче, и силы резания уменьшаются, что позволяет инструменту двигаться с большой рабочей подачей [4].

Достижение эффекта HSM обусловлено структурными изменениями материала в зоне отрыва стружки. Это связано с образованием пластических деформаций, происходящих с высокой скоростью. При повышении скорости деформаций силы резания первоначально растут, а потом, с достижением определенной температуры в зоне образования стружки, начинают значительно сокращаться. При этом время контакта режущей кромки с заготовкой и стружкой так мало, а скорость отрыва стружки столь высока, что большая часть тепла, образующегося в зоне резания, удаляется вместе со стружкой, а заготовка и инструмент не успевают существенно нагреваться. Этот эффект уже был известен ранее. Однако обновление техники неизбежно влечет за собой необходимость совершенствования управляющих программ для HSM-траекторий. На основе исследований процессов обработки и HSM-программирования специалистами [9] выработаны различные рекомендации, связанные непосредственно с выбором оборудования, режимов резания и позиционирования режущего инструмента.

4.

В заключение следует подчеркнуть, что многими специалистами признано преимущество использования анодно-механической обработки [8], с помощью которой можно получать детали более высокого качества, а также обеспечить значительное повышение работоспособности и износостойкости режущего инструмента. Однако анодно-механическое фрезерование пока не имеет широкого распространения. В то же время известно [8, 9], что при чистовых и финишных операциях анодно-механической обработки наиболее эффективны схемы резания, включающие в себя последовательное действие механической, а затем электрохимической составляющей.

В основе такого способа обработки лежит сочетание электроконтактного взаимодействия инструмента и заготовки (механическое разрушение или формоизменение металлических поверхностей, производимое одновременно с нагревом или расплавлением этих поверхностей электрическим током) и гальванического процесса (в данном случае — анодного растворения металла с обрабатываемой поверхности). Движущийся инструмент не только подводит ток и удаляет размягченный металл, но и благодаря вибрации способствует возникновению множества прерывистых контактов, необходимых для образования дуговых разрядов [10]. Электроконтактная обработка может выполняться как в воздушной, так и жидкой среде. Производительность обработки почти линейно растет с увеличением напряжения и мощности источника питания.

Существенное воздействие на качество формируемой поверхности при анодном фрезеровании алюминиевых сплавов оказывают: материал заготовки и режущего инструмента, число зубьев фрезы, режимы резания, геометрические параметры и точность позиционирования применяемых сменных режущих пластин, взаимное расположение фрезы относительно заготовки (симметричное/несимметричное), направление фрезерования (встреч-

ное/попутное), наростообразование, величина тока и напряжения в зоне контакта инструмента и заготовки, наличие и вид смазочно-охлаждающей технологической среды (или состав и концентрация электролита), а также способ её подачи. Следовательно, анодное фрезерование позволяет управлять качеством обработки и оптимизировать технологический процесс за счёт широкого спектра возможных значений любого из воздействующих факторов.

Задача сегодняшнего дня: более полно исследовать и одновременно использовать возможности таких комплексных методов обработки, добиваться улучшения качественных характеристик деталей транспортных машин, подвижного состава для железных дорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов М. Ю., Иноземцев В. Е. Влияние условий резания на поверхность металлокерамики // Мир транспорта. — 2012. — № 2. — С. 44—49.
2. Куликов М. Ю., Иноземцев В. Е., Мо Нанг У. Влияние электрической активации на качество поверхности при чистовой обработке пластичных материалов. Электрофизические и электрохимические методы обработки // Металлообработка. — 2013. — № 4. — С. 40—43.
3. Бартл Д., Мудрох О. Технология химической и электрохимической обработки поверхностей. — М.: Машиностроение, 1991. — 712 с.
4. Атанасянц А. Г. Электрохимическое изготовление деталей атомных реакторов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 176 с.
5. Сулов А. Г. Качество поверхности слоя деталей машин. — М.: Машиностроение, 2000. — 320 с.
6. Режимы резания металлов: Справочник / Под ред. Ю. В. Барановского. — М.: Машиностроение, 1972. — 407 с.
7. Грубый С. В., Зайцев А. М. Исследование концевых фрез при фрезеровании корпусных деталей из алюминиевых сплавов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Баумана. — 2013. — № 12. — С. 31—54. [Электронное издание]: <http://elibrary.ru/download/56548745.pdf>. DOI: 10.7463/1213.0634375. Доступ 6.07.2015.
8. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. — М.: Высшая школа, 1974. — 562 с.
9. Степанов А. В. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве. Часть 2. Траектории режущего инструмента для HSM. CAD/CAM/CAE Observer 4 (13) 2003. [Электронное издание]: http://www.cadcamcae.lv/hot/hsm_part2.pdf. Доступ 6.07.2015.
10. Валтов В. А., Мурашко В. Б. Основы технологии приборостроения. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. — 180 с.

Координаты авторов: **Евсеев Д. Г.** — evseevvg@gmail.com, **Куликов М. Ю.** — muk.56@mail.ru, **Иноземцев В. Е.** — vitalin-85@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 26.03.2015, принята к публикации 08.07.2015.



Evseev, Dmitry G., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Kulikov, Mikhail Yu., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Inozemtsev, Vitaly E., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

A method of providing the quality of surface of assembly parts made of non-ferrous metals and their alloys is developed. A scheme of unit is determined, providing the necessary conditions of machining,

designed for combination of mechanical and anode impact on the workpiece surface. Complex technology allows to achieve a set of qualitative characteristics and widely vary parameters in the operations of both turning and milling.

Keywords: transport machines, processing of assembly parts, machining, finishing, aluminum, silumin, turning, milling, quality parameters, surface roughness, electrolyte, cutting speed.

Background. Application of high-tech materials allows to provide the desired level of quality of engineering products. Technologies for production of these materials allow to create in most cases ready-made parts without additional forming operations. Certain categories of metal product are obtained by applying the finish machining. Therefore, problems accompanying these operations, are very urgent and require an individual approach to solve them.

Processing of non-ferrous metals and their alloys belongs to this kind of problem and requires search for special solutions and technological approaches. It is known that the widespread use of, for example, aluminum and its alloys in the railway sector is the result of efforts aimed at reducing the axial load, as these materials possess all the physical and mechanical properties of structural materials and are non-corrosive. Besides, many aluminum alloys are well handled by welding. However, machining of these alloys is hindered at low roughness of the surface, components and assembly parts.

Objective. The objective of the authors is to consider new methods of finishing of assembly parts made of non-ferrous metals and their alloys.

Methods. The authors use general scientific methods, methods and techniques of mechanical engineering, simulation, comparative analysis, graph construction.

Results.

1.

It is experimentally confirmed that an effective way to obtain the required quality parameters of the surface layer of parts made of non-ferrous and porous ceramic-metal material is edge cutting anode-mechanical machining (hereinafter – AMM) [1].

Edge cutting AMM in turning is a combination of methods of removal of the main part of excess metal mechanically and simultaneous anodic dissolution of the metal of surface to be processed. The roughness of the surface obtained depends on machining modes, forming a preliminary surface layer structure which is a base for anode processing. The better is surface roughness achieved by cutting edge machining, the more effective is the action of anodic treatment for achieving final parameters of surface roughness [2].

In case of edge cutting AMM different combinations of mechanical and electrochemical components are possible that are implemented by various modes of introduction of electric current to the cutting area. Our studies determine the most effective electric circuit that allows to reach the lower surface roughness of copper and aluminum alloys.

Based on the analysis of the sources [1, 2], in processing of assembly parts the following factors

varied: operating voltage – U , V (12–24V), cutting speed – V , m/min (100–350 m/min), concentration of applied electrolyte – ω , % (20–40%). Other factors are fixed and remain constant.

Studies were conducted using three different types of circuits with different types of electrodes' connection (Pic. 1). In all cases the positive charge of the electric current was fed to the workpiece. In all three schemes position of the second negative electrode varied. In the first scheme, the electrode was brought directly to the tool. In the second scheme, the electrode was fed into the tank with the electrolyte. In the third scheme it was fed to the cutting zone by a distance of 0, 1 to 0, 5 mm from the workpiece.

As shown by the results of studies (Pic. 2) during the cutting of silumin with edge cutting AMM the lowest roughness is achieved when using the circuit 3, in which after cutting anodic dissolution of the treated surface takes place. It is known that the formation of oxides on the treated surface substantially reduces the performance of electrochemical treatment. This is particularly significant for anodic dissolution of aluminum alloys having high ability to oxidize [3]. Application of this scheme allows for the lowest machined surface roughness in the process of edge cutting AMM. In this case, the primary excess metal is removed by edge tool, remaining excess metal is removed after anodic dissolution and final microrelief is formed during electrochemical machining.

2.

Further studies were carried out using the scheme 3. A large influence of electrolyte composition on the performance of electrochemical treatment is known [3]. The electrolyte was aqueous solutions of sodium chloride and sodium nitrate. As the results of the study (Pic. 4) show, the most effective is the use of an aqueous solution of sodium chloride. The processing takes place effectively at a solution concentration of about 25–30%. Increase in its concentration by a higher level impairs the machined surface roughness, increases the viscosity of the electrolyte solution [3, 4], which leads to a decrease in productivity of anodic dissolution process.

The voltage change in the circuit during edge-cutting AMM also affects the machined surface roughness. During the research voltage in circuit varied in the range of 12–24 V. Further increase in voltage leads to a breakdown in the electrode gap. Nevertheless, these experimental results (Pic. 3) show that increase in the voltage in the circuit affects roughness quality positively.

The high content of aluminum in the samples of silumins (about 87%) increases the rate of anodic dissolution during edge-cutting AMM. Therefore,

processing was performed at high speeds using such etching conditions that reduce the level of roughness. The results showed (Pic. 2), that the minimum roughness of processed surface of silumins is achieved at cutting speeds ranging from 200 to 300 m/min.

During experimental studies of forming surface quality when processing silumins, it was found out that the machined surface roughness reaches $Ra < 0,60 \mu\text{m}$ at edge-cutting AMM using 30% aqueous solution of NaCl, at a cutting speed of 250 m/min and a voltage of electric circuit of 24 V.

Formation of roughness of processed surface of silumins using the third electric circuit of edge-cutting AMM consists of two consecutive stages: removal of excess metal with the help of edge-cutting mechanical machining and subsequent anodic dissolution of the metal of the surface, which came out from under the instrument. Previously developed mathematical model of the roughness of the machined surface [5] during edge-cutting AMM of silumins taking into account the nature of the process, takes the following form:

$$Rz = h1+h2+h3+h4-h5, \tag{1}$$

where Rz is average height of roughness of the profile;

$h1$ is component of the roughness profile due to geometry and kinematics of the movement of the tool's working part;

$h2$ is component of the roughness profile due to fluctuations in the tool relative to the treated surface;

$h3$ is component of the roughness profile due to plastic deformations in the zone of contact between the tool and the workpiece;

$h4$ is component of the roughness profile due to the roughness of the working surfaces of the instrument;

$h5$ is the value of change of the roughness profile due to anodic dissolution in edge-cutting AMM.

As a result of statistical processing of experimental data model for forming the roughness of the machined surface for edge-cutting AMM has got the following form:

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

wherein Ra is indicator of roughness (μm); V is cutting speed (m/min); ω is electrolyte concentration (%); U is voltage (V).

3.

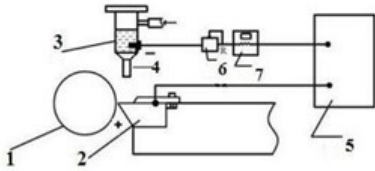
Also, the optimization of conditions for forming the roughness of machined surface of silumins when deploying and thread cutting by method of edge-cutting AMM was performed. The operating principle in these operations with alloys is insignificantly different from edge-cutting AMM by turning. The feature of these processes is in a different interaction of the cutting tool with the workpiece surface. When deploying and thread cutting edge of the cutting portion of the tool allows to get basic geometrical parameters, and the subsequent process of anodic dissolution forms geometric parameters of the processed surface.

As a result, we get a mathematical model to reduce the surface roughness during edge-cutting AMM when deploying:

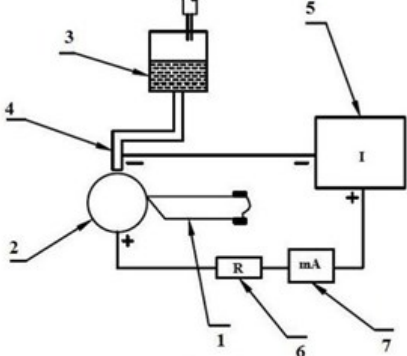
$$Ra = \frac{e^{0,1545} \cdot \omega^{0,039}}{V^{0,03} \cdot U^{0,35}}. \tag{3}$$

As a result of relevant calculations and transformations a mathematical model to reduce the surface roughness via edge-cutting AMM during thread cutting acquires the following form:

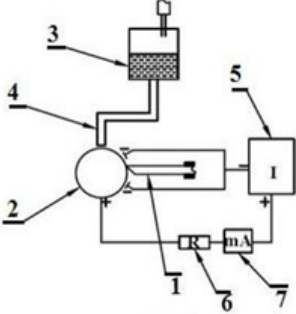
Scheme 1



Scheme 2



Scheme 3



Pic. 1. Schematic diagrams of installations for carrying out anode-mechanical machining:
1 – cutting tool; 2 – workpiece; 3 – electrolyte;
4 – a metal tube; 5 – power supply;
6 – variable resistor; 7 – microammeter.

$$Ra = \frac{e^{8,39} \cdot \omega^{0,66}}{V^{0,72} \cdot U^{3,86}}. \tag{4}$$

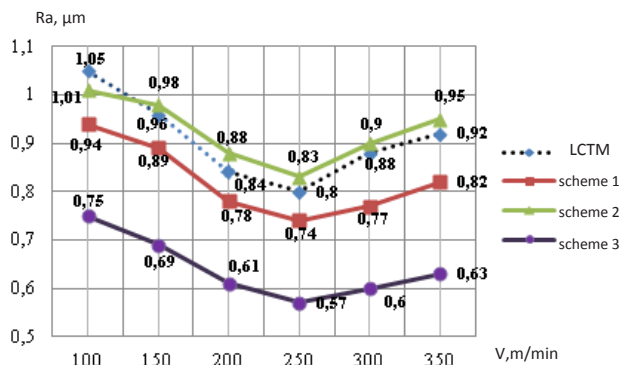
The optimal cutting conditions when deploying and thread cutting: $V = 20 \text{ m/min}$, $U = 24\text{V}$, 30% sodium chloride solution with the addition of 2% sodium nitride (roughness when deploying was $Ra \text{ } 0,51 \mu\text{m}$, roughness at thread cutting was $Ra \text{ } 0,21 \mu\text{m}$).

When finishing aluminum alloys recommended cutting speed is 400–500 m/min [6]. As shown by research, during AMM optimal speed is 250 m/min. Conducted wear resistant tests indicate that the reduction in the cutting speed at finishing aluminum alloys allows to reduce the intensity of dimensional wear by 1,5–3 times and to achieve much lower roughness of the treated surface (reduction by more than twice).

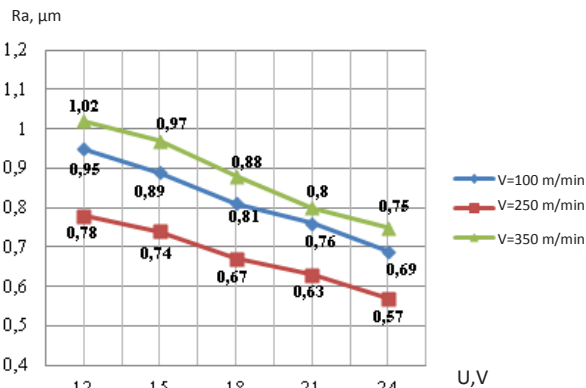
In that regard, advantage of finishing edge-cutting AMM of silumins compared to conventional turning is lower machined surface roughness ($Ra \text{ } 0,6 \mu\text{m}$ versus $Ra \text{ } 1,3 \mu\text{m}$) at a much lower (1,5–3 times) intensity of dimensional wear of the tool, achieved by reducing the cutting speed. When using traditional finish turning



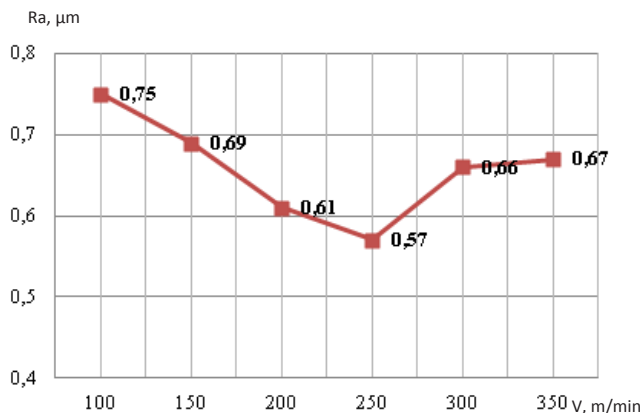
Pic. 2. Comparative results of roughness of the machined surface obtained by cutting with different electric circuits.



Pic. 3. Influence of electrical circuit voltage on surface roughness when processing silumins.



Pic. 4. Influence of electrolyte concentration on roughness of processed surface of silumins.



the minimum roughness Ra reaches about 1,25–1,3 μm . Therefore, to achieve roughness Ra 0,6 μm in this case, it is necessary to introduce additional technological operations of finishing, which significantly increase the complexity of the entire process of machining of parts made of silumins.

Study of the formation of the quality of the surface of parts made of aluminum and aluminum alloys in the milling process also confirms the appropriateness of AMM. The pattern of forming is also described by the formula (1), but in this case it is necessary to take into account different nature of the interaction of the cutting tool with the work surface, and presence of multiple cutting edges that can promote the growth of roughness at the macro level. In the study on improving the efficiency of milling technology [7] it

was found that there is no close relationship between roughness and operating parameters of machining. Also, the predominant influence on the roughness belongs to parameters of equipment: allowable rotational moment on a spindle, power, rigidity. If the requirements for the equipment during milling of aluminum alloy are met, machined surface roughness can be between Ra 0,6–0,8 μm .

Rigidity and accuracy of positioning of technological equipment used in the operations are of great importance for the quality of the formation of the surface layer of parts made of aluminum alloys. At present quality parameters are provided through the use of modern high-performance machining equipment with NC, this equipment allows for high-speed machining (HSM). Its distinguishing feature is

high cutting speed at which the temperature in the area of chip formation increases considerably, workpiece material becomes softer and cutting forces reduce, which allows the tool to move with great working feed [4].

Achievement of HSM effect occurs due to structural changes in the material in chip separation area. This is associated with the formation of plastic deformations occurring at a high speed. With increasing deformation speed cutting forces initially grow and then, with achieving a certain temperature in the area of chip formation, begin to decline significantly. The time of contact of the cutting edge with the workpiece and the chip is so small and the rate of chip separation is so high that most of the heat generated in the cutting area is removed along with the chips, and the workpiece and the tool do not have time to significantly warm. This effect has already been known. However, modernization of equipment inevitably leads to the need to improve control programs for HSM-trajectories. On the basis of many studies of processing and HSM-programming experts [9] developed a variety of recommendations directly connected with the choice of equipment, cutting conditions, the selection and positioning of the cutting tool.

4.

In conclusion, it is worth noting that many specialists admit advantage of using the anode-mechanical machining [8], which can be used to obtain higher quality parts, and provide a significant increase in performance and durability of the cutting tool. However, anode-mechanical milling is not widespread. It is also known [8; 9] that in finishing operations of anode-mechanical machining those cutting schemes are the most effective, which include the consistent action of mechanical, and then of electrochemical component.

The basis of this method of treatment is a combined electrical contact interaction between tool and workpiece (mechanical destruction or deformation of the metal surfaces produced simultaneously with heating or melting of these surfaces with electric current) and plating process (in this case, anodic dissolution of metal from the treated surface takes place). Moving tool not only brings current and removes the softened metal, but also due to vibration, contributes to a plurality of intermittent contacts necessary for formation of arc discharges [10]. Electric-contact processing may be performed in air or in a liquid medium. Processing performance increases almost linearly with the increase of voltage and power of power supply.

An important role in achieving quality of the formed surface during the anode milling of aluminum alloys belongs to: material of workpiece and cutting tools, the number of teeth of millers, cutting modes, geometry and accuracy of positioning of used replaceable cutting inserts, relative position of the miller relative to the workpiece (symmetrical / asymmetrical milling), milling direction (counter/

transverse), built-up forming, current and voltage in the contact area between tool and workpiece, presence and type of lubricant-cooling technological environment (or composition and concentration of electrolyte), as well as to a selected method of its supply. Therefore, the anode milling allows to control quality of processing and optimize the technological process due to the wide range of possible values of any of the influencing factors.

Conclusion. The challenge of today is to study more fully and to take advantage of these complex processing techniques, to seek to improve the quality characteristics of parts of transport vehicles, rolling stock for railways.

REFERENCES

1. Kulikov, M. Yu., Inozemtsev, V. E. Impact of cutting conditions on metal ceramics surface. *World of Transport and Transportation*, Vol. 10, 2012, Iss. 2, pp. 44–49.
2. Kulikov, M. Yu., Inozemtsev, V. E., Moe Naing W. Effect of electrical activation on the surface quality at finishing plastic materials. Electrophysical and electrochemical processing techniques [*Vlijanie elektricheskoy aktivatsii na kachestvo poverhnosti pri chistovoy obrabotke plastichnykh materialov. Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki*]. *Metalloobrabotka*, 2013, Iss. 4, pp. 40–43.
3. Bartle, D., Mudroh, O. Technology of chemical and electrochemical surface treatment [*Tekhnologiya himicheskoy i elektrokhimicheskoy obrabotki poverhnostej*]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1991, 712 p.
4. Atanasyants, A. G. Electrochemical production of parts of nuclear reactors [*Elektrokhimicheskoe izgotovlenie detalej atomnykh reaktorov*]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1987, 176 p.
5. Suslov, A. G. The quality of the surface layer of machine parts [*Kachestvo poverhnosti sloja detalej mashin*]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000, 320 p.
6. Metal cutting modes: Guide [*Rezhimy rezanija metallov: Spravochnik*]. Ed. by Y. V. Baranovsky. Moscow, Mashinostroenie publ., 1972, 407 p.
7. Grubiy, S. V., Zaitsev, A. M. Study on end-milling cutters during milling of housing parts made of aluminum alloys [*Issledovanie kontsevykh frez pri frezerovaniji korpusnykh detalej iz aluminievyykh splavov*]. *Education & Science: Scientific edition of Bauman MSTU*, 2013, Iss. 12, pp. 31–54. [Electronic edition]: <http://elibrary.ru/download/56548745.pdf>.
8. Poduraev, V. N. Cutting of difficult-to-machine materials [*Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov*]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1974, 562 p.
9. Stepanov, A. V. High speed milling in modern production. Part 2. Trajectories of cutting tools for HSM. [*Vysokoskorostnoe frezerovanie v sovremennoy proizvodstve*]. *CAD / CAM / CAE Observer*, 2003, Iss. 4 (13). [Electronic edition]. http://www.cadcamcae.lv/hot/hsm_part2.pdf. Last accessed 6.07.2015.
10. Valetov, V. A., Murashko, V. B. Fundamentals of instrumentation technology [*Osnovy tekhnologii priborostroenija*]. St. Petersburg, SPbGU ITMO publ., 2006, 180 p.

Information about the authors:

Evseev, Dmitry G. – D.Sc. (Eng.), professor, president of Institute of transport technics and control systems of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, evseevdg@gmail.com.

Kulikov, Mikhail Yu. – D.Sc. (Eng.), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, muk.56@mail.ru.

Inozemtsev, Vitaly E. – Ph.D. (Eng.), senior lecturer of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, vitalin-85@mail.ru.

Article received 26.03.2015, accepted 08.07.2015.

