

УДК 621.9.04  
DOI: 10.12737/22063

М.Ю. Куликов, В.Е. Иноземцев, М.Г. Крукович, Мо Наинг У

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Рассматривается возможность совершенствования способа комбинированной отделочной механической обработки, при котором обработка поверхности идёт благодаря совместному действию режущего инструмента

и анодного растворения металла под воздействием электрического тока в растворе электролита.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, комбинированная обработка, способы, шероховатость, параметры качества поверхности, формообразование.

M. Yu. Kulikov, V. E. Inozemtsev, M. G. Krukovich, Mo Naing U

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FORMING PROCESSES AT ALUMINUM ALLOY TREATMENT

It is well known that machining aluminum and its alloys is accompanied by very considerable changes in quality parameters of parts surface layers which affect greatly performance attributes. The study of the machining conditions influence upon surface layer quality in parts allows defining optimum cutting parameters and increasing performance attributes of many parts. It is well known that there are alternative methods of shaping which are a combined treatment which can include a mechanical, electrical and chemical influence upon a surface worked.

Combined methods of treatment possess a wide range of controlled factors affecting a quality level of a surface formed and that is why they are convenient and effective in use during processes of shaping in parts made of difficult-to cut and heterogeneous materials.

### Введение

Известно, что механическая обработка алюминия и его сплавов сопровождается очень существенными изменениями параметров качества поверхностного слоя деталей, которые оказывают большое влияние на эксплуатационные свойства [1]. Силумины применяются в авиационной и автомобильной промышленности, из них изготавливают поршни, картеры и блоки цилиндров двигателей. Также алюминий и его сплавы широко применяются на железнодорожном транспорте. В настоящее

As the investigation results have shown during edge cutting machining anodic-mechanical treatment in the course of cutting Al 2 and Al 3 silumins the oxides formation on the surface worked worsens considerably electro-chemical processes. Particularly it is significant at anodic dissolution of aluminum alloys having a high capacity to oxidation.

The method of electro-mechanical combined treatment allows managing qualitative indices in the course of surface shaping and as a result promoting the achievement of an essential level in quality parameters of a surface level.

**Key words:** aluminum alloys, combined treatment, methods, roughness, surface quality parameters, shaping.

время они широко используются в области локомотивостроения и вагоностроения для изготовления деталей тормозной аппаратуры, поршней дизелей, компрессоров и других деталей.

Изучение влияния условий механической обработки на качество поверхностного слоя деталей позволяет определить оптимальные параметры резания и увеличить эксплуатационные характеристики многих деталей.

### Исследование проблемы

Исследованием процессов лезвийной обработки алюминиевых сплавов занимаются многие учёные, в том числе специалисты из университета Клемсона в Меж-

дународном центре автомобильных исследований [2], технологического университета Северного Техаса Discovery Park [3] и другие [5; 6]. Большой ассортимент спла-

вов на основе алюминия, количество которых обусловлено технологическими требованиями различного уровня, указывает на необходимость определения рациональных методов и технологических подходов к их обработке для снижения трудоёмкости процессов за счёт сокращения числа операций и основного технологического времени и повышения качества продукции.

Механическая обработка материалов на основе алюминия сопровождается задирами на поверхности [6], выходящей из-под резца, а также налипанием удаляемого материала на режущую кромку инструмента, что приводит к снижению эффективности процесса резания, повышенному тепловыделению и износу инструмента. Для достижения высокого качества поверхности при резании силуминов рекомендуется использовать специальные режущие пластины с алмазоподобным углеродным покрытием и другими износостойкими покрытиями. При этом режущий инструмент должен обладать большим передним углом, малым радиусом округления режущей кромки  $r$  и малым радиусом вершины инструмента  $r$ . Для увеличения теплоотвода в отдельных случаях, когда ведётся обработка тонкостенных втулок, целесообразно использовать СОТС. Также в целях снижения шероховатости возможно добавление в СОТС химических реактивов, снижающих прочность удаляемого слоя материала. Так, анодно-механическая обработка силумина с применением раствора каустической соды позволила получить поверхность с шероховатостью  $Ra$  0,6 - 0,7; скорость резания  $V$  составила 214 м/мин, подача  $S$  - 0,05 мм/об, глубина резания  $t$  - 0,5 мм. В качестве режущего инструмента использовались сменные режущие пластины из твёрдого сплава с покрытием TiN, имеющие чашечную форму.

Перечнем научных исследований были сформулированы основные положения и рекомендации, связанные с определением соответствующих режимов обработки, выбором условий среды резания, и требования, которым должен отвечать применяемый режущий инструмент. Но также известно, что существуют нетрадиционные способы формообразования,

представляющие собой комбинированную обработку, которая может включать механическое, электрическое и химическое воздействие на обрабатываемую поверхность. Комбинированные методы обработки обладают широким спектром управляемых факторов, влияющих на уровень качества формируемой поверхности, и поэтому являются удобными и эффективными при применении в процессах формообразования деталей из труднообрабатываемых и неоднородных материалов.

Существует отдельная группа способов комбинированной обработки, сочетающих методы воздействия на поверхность с наложением электрического поля. К их числу относится и электрохимико-механический комбинированный метод обработки. Данный метод представляет обработку поверхности за счёт анодного процесса, основными видами воздействия здесь являются механическое силовое и химическое. Как показывают исследования, электрохимикомеханический комбинированный метод обработки является эффективным для достижения требуемых значений шероховатости поверхности деталей из металлокерамических спечённых материалов; металлокомпозитов, получаемых литьём, силуминов и других материалов.

Чистовую анодно-механическую обработку рекомендуется осуществлять при малых плотностях электрического тока [4], поэтому основное значение при её выполнении имеют механизмы анодного растворения и механического снятия плёнки движущимся инструментом. Эти процессы происходят преимущественно по вершинам микронеровностей: они подвержены наиболее интенсивному электрохимическому воздействию и только на них происходит непрерывное механическое удаление плёнки. Во впадинах микронеровностей формируется толстый слой плёнки, играющий защитную роль. В совокупности это приводит к непрерывному уменьшению шероховатости, достижению высокой точности и чистоты поверхности.

Как показали результаты исследований, при лезвийной анодно-механической обработке в процессе резания силуминов

АЛ2, АЛ3 образование окислов на обрабатываемой поверхности значительно ухудшает протекание электрохимических процессов. Особенно это значимо при анодном растворении алюминиевых сплавов, имеющих высокую способность к окислению [5].

Известно большое влияние состава электролита на показатели электрохимической обработки [5]. В качестве электролита использовались водные растворы NaCl и NaNO<sub>3</sub>. Как показали результаты исследования процессов формообразования, наиболее эффективным является использование 25–30%-го водного раствора хлорида натрия NaCl. Дальнейшее увеличение концентрации раствора NaCl более 30% снижает влияние анодного процесса на обеспечение требуемой шероховатости поверхности. Согласно исследованиям [5-7], повышение концентрации электролита увеличивает вязкость раствора электролита, что приводит к уменьшению производительности процесса анодного растворения.

Изменение напряжения в электрической цепи при лезвийной анодно-механической обработке также влияет на шероховатость обработанной поверхности. При проведении исследований напряжение

в электрической цепи изменялось в диапазоне 12-24 V. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к пробоев в межэлектродном зазоре. Из приведённых результатов экспериментов следует, что увеличение напряжения в цепи способствует улучшению шероховатости.

Также экспериментально установлено, что в процессе анодно-механической обработки изменение скорости резания существенно влияет на шероховатость формируемой поверхности детали. Большое содержание алюминия в образцах исследуемых силуминов (около 87%) способствует увеличению скорости процесса анодного растворения, поэтому обработка осуществлялась на высоких скоростях при использовании таких условий травления, которые позволяют снизить уровень шероховатости. Результаты исследований показали, что минимальная шероховатость обработанной поверхности силуминов достигается при скоростях резания в диапазоне 200-300 м/мин.

Было установлено, что шероховатость обработанной поверхности достигает  $Ra < 0,60$  мкм при использовании 30%-го водного раствора NaCl при скорости резания 250 м/мин и напряжении электрической цепи 24 V (рисунок).

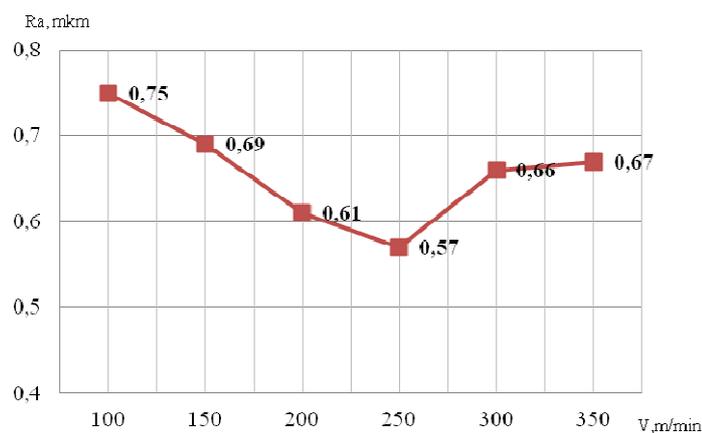


Рис. Влияние концентрации электролита на качество поверхности силумина

### Моделирование процесса формообразования

Формирование шероховатости обработанной поверхности силуминов в условиях анодно-механической обработки со-

стоит 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 [8] при лезвийной анодно-механической обработке силуминов с учётом характера протекания процесса приобретает следующий вид:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - h_5$$

где  $R_z$  – средняя высота профиля шероховатости;  $h_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента;  $h_2$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности;  $h_3$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки;  $h_4$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента;  $h_5$  – величина изменения профиля шероховатости, обусловленная анодным растворением при лезвийной анодно-механической обработке.

В результате статистической обработки экспериментальных данных модель формирования шероховатости обработанной поверхности для лезвийной анодно-механической обработки имеет следующий вид:

$$R_a = \frac{\omega^{0,033}}{v^{0,106} U^{0,06} \tau^{0,022}}$$

### Заключение

Как показали проведенные исследования, при анодно-механической обработке оптимальная скорость резания составляет 250 м/мин. Проведенные стойкостные испытания свидетельствуют о том, что снижение скорости резания при чистовой обработке алюминиевых сплавов позволяет уменьшить интенсивность размерного износа инструмента в 1,5 – 3 раза при значительно меньшей шероховатости обработанной поверхности (снижение более, чем в два раза). Исходя из этого преимуществом чистовой лезвийной анодно-

где  $R_a$  – показатель шероховатости (мкм);  $V$  – скорость резания (м/мин);  $\omega$  – концентрация электролита (%);  $U$  – напряжение электрической цепи (V).

Также проведена оптимизация условий формирования шероховатости обработанной поверхности силуминов при развёртывании методом анодно-механической обработки. Принцип действия лезвийной анодно-механической обработки при развёртывании несущественно отличается от лезвийной анодно-механической обработки точением. Особенность данных процессов формирования шероховатости поверхности заключается в ином взаимодействии режущего инструмента с поверхностью заготовки. Таким образом, при развёртывании кромка режущей части инструмента позволяет получить основные геометрические параметры, а последующий процесс анодного растворения формирует окончательные геометрические параметры обработанной поверхности.

В результате полученная математическая модель уменьшения шероховатости поверхности для лезвийной анодно-механической обработки при развёртывании имеет следующий вид:

$$R_a = \frac{\omega^{0,134} \tau^{0,033}}{v^{0,03} U^{0,35}}$$

Оптимальные условия резания при развёртывании достигаются при  $V = 20$  м/мин,  $U = 24$  V и применении 30%-го раствора хлорида натрия с добавлением 2% нитрата натрия (шероховатость при развёртывании составила  $R_a 0,51$  мкм).

механической обработки силуминов по сравнению с традиционным точением является более низкая шероховатость обработанной поверхности ( $R_a 0,6$  мкм против  $R_a 1,3$  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 достигает  $R_a 1,25 - 1,3$  мкм. Поэтому для достижения шероховатости  $R_a 0,6$  мкм в этом случае необходимо вводить дополнительные тех-

нологические операции финишной обработки, которые значительно увеличивают трудоёмкость всего технологического процесса механической обработки деталей из силуминов.

Метод электрохимико-механической комбинированной обработки позволяет

управлять качественными показателями в процессе формообразования поверхности, в результате способствуя достижению необходимого уровня параметров качества поверхностного слоя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulikov, M.Yu. Technological method for the finishing process of fusible alloy Precision Machining VII / M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, Oo. Myo Naing // Selected, peer reviewed papers from the 7th International Congress of Precision Machining (ICPM 2013). - Miskolc, Hungary, 2013. - P. 224-228.
2. Mathew, A. Effect of Machining Feed on Surface Roughness in Cutting 6061 Aluminum / A. Mathew, Kuttolamadom, Sina Hamzehlouia, Laine Mears M. - URL: <http://www.clemson.edu/manufacturing-lab/documents/publications/kuttolamadom%25202010b.pdf>.
3. Nourredine Boubekri, Vasim Shaikh. Machining using minimum quantity lubrication: a technology for sustainability. URL: [http://www.ijastnet.com/journals/Vol\\_2\\_No\\_1\\_January\\_2012/13.pdf](http://www.ijastnet.com/journals/Vol_2_No_1_January_2012/13.pdf).
4. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. - М.: Высш. шк., 1974. - С. 469-470, С. 494.
5. Иноземцев, В.Е. Обработка металлокерамики / В.Е. Иноземцев // Научные труды международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении». - М.: Машиностроение, 2010. - 571 с.
6. Anna Carla Araujo1. Micro milling cutting forces on machining aluminum alloy / Anna Carla Araujo1, Adriane Lopes Mougo, Fabio de Oliveira Campos. -URL: <http://minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/65377/0064-1.pdf?sequence=1>.
7. Ковенский, И.М. Структурные превращения в металлах и сплавах при электролитическом воздействии / И.М. Ковенский, В.Н. Кусков, Н.Н. Прохоров. - Тюмень: ГНГУ, 2001. - С.115.
8. Куликов, М.Ю. Способ улучшения качества поверхностного слоя с помощью комбинированной механо-электрохимической обработки / М.Ю. Куликов, В.Е. Иноземцев, У. Мо Наинг // Сборник научных трудов «Високи тенології в машинобудуванні». - Харьков: ИТУ «ХПИ», 2012. - №1. - С. 168 – 170.
1. Kulikov, M.Yu. Technological method for the finishing process of fusible alloy Precision Machining VII / M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, Oo. Myo Naing // Selected, peer reviewed papers from the 7th International Congress of Precision Machining (ICPM 2013). - Miskolc, Hungary, 2013. - P. 224-228.
2. Mathew, A. Effect of Machining Feed on Surface Roughness in Cutting 6061 Aluminum / A. Mathew, Kuttolamadom, Sina Hamzehlouia, Laine Mears M. - URL: <http://www.clemson.edu/manufacturing-lab/documents/publications/kuttolamadom%25202010b.pdf>.
3. Nourredine Boubekri, Vasim Shaikh. Machining using minimum quantity lubrication: a technology for sustainability. URL: [http://www.ijastnet.com/journals/Vol\\_2\\_No\\_1\\_January\\_2012/13.pdf](http://www.ijastnet.com/journals/Vol_2_No_1_January_2012/13.pdf).
4. Poduraiev, V.N. *Difficult-to-Cut Materials Cutting* / V.N. Poduraiev. - M.: Higher School, 1974. - pp. 469-470, pp. 494.
5. Inozemtsev, V.E. Cermets treatment / V.E. Inozemtsev // Proceedings of the Inter. Scientific-Pract. Conf. "Fundamental Problems & Modern Techniques in Mechanical Engineering". - M.: Mechanical Engineering, 2010. - pp. 571.
6. Anna Carla Araujo1. Micro milling cutting forces on machining aluminum alloy / Anna Carla Araujo1, Adriane Lopes Mougo, Fabio de Oliveira Campos. -URL: <http://minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/65377/0064-1.pdf?sequence=1>.
7. Kovensky, I.M. *Structural Transformations in Metals and Alloys at Electrical Action* / I.M. Kovensky, V.N. Kuskov, N.N. Prokhorov. - Tyumen: GNGU, 2001. - pp.115.
8. Kulikov, M.Yu. Method for quality improvement in surface layer using combined mechanical electrochemical treatment / M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, U. Mo Naing // Proceedings «Високи тенології в машинобудуванні». - Kharkov: ITU «KhPI», 2012. - №1. - pp. 168 – 170.

Статья поступила в редколлегию 11.07.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор  
Карлова Т.В.

## Сведения об авторах:

**Куликов Михаил Юрьевич**, д.т.н., профессор Института конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН), Москва, e-mail: [muk.56@mail.ru](mailto:muk.56@mail.ru).

**Иноземцев Виталий Евгеньевич**, к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МГУПС МИИТ); сотрудник лаборатории в Институте конструкторско-технологической информатики (ИКТИ РАН), e-mail: [vitalin-85@mail.ru](mailto:vitalin-85@mail.ru).

**Kulikov Mikhail Yurievich**, D.Eng., Prof., Institute of Design-Technological Informatics RAS (IDTI RAS), Moscow, e-mail: [muk.56@mail.ru](mailto:muk.56@mail.ru).

**Inozemtsev Vitaly Evgenievich**, Can.Eng., Senior Lecturer of the Dep. "Technology of Transport Mechanical Engineering and Rolling-Stock Repair", Emperor Nikolay II State University of Communications of Moscow (ENSUCM MIET); worker of the Lab. in Institute of Design-Technological Informatics (IDTI RAS), e-mail: [vitalin-85@mail.ru](mailto:vitalin-85@mail.ru).

**Крукович Марат Григорьевич**, д.т.н., профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МГУПС МИИТ), e-mail: [bormag@beehive.miiit.ru](mailto:bormag@beehive.miiit.ru).

**Мо Наинг У**, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МГУПС МИИТ), e-mail: [myonaingoo@mail.ru](mailto:myonaingoo@mail.ru).

**Krukovich Marat Grigorievich**, D.Eng., Prof. of the Dep. "Technology of Transport mechanical Engineering and Rolling-Stock Repair", Emperor Nikolay II State University of Communications of Moscow (ENSUCM MIET), e-mail: [bormag@beehive.miiit.ru](mailto:bormag@beehive.miiit.ru).

**Mo Naing U**, post graduate student of the Dep. "Technology of Transport Mechanical Engineering and Rolling-Stock Repair", Emperor Nikolay II State University of Communications of Moscow (ENSUCM MIET), e-mail: [myonaingoo@mail.ru](mailto:myonaingoo@mail.ru).