

УДК 196

DOI: 10.12737/22084

М.Ю. Куликов, В.Е. Иноземцев, А.А. Бочаров, Мо Наинг У

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АНОДНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Представлены различные технологические показатели эффективности протекания процесса формообразования в условиях фрезерования алюминия и его сплавов. Рассмотрены возможности обеспечения качества получаемой поверхности при обработке и снижения интенсивности нежелательных динамических и тепловых воздействий на тех-

нологическую систему и процессы формообразования в современных условиях обрабатываемой промышленности.

**Ключевые слова:** алюминий, фрезерование, формообразование, чистовая обработка, шероховатость, комбинированная обработка, параметры качества, АМО.

M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, A.A. Bocharov, Myo Naing Oo

## PECULIARITIES IN SURFACE ROUGHNESS FORMATION AT ANODIC-MECHANICAL TREATMENT

The solution of problems belonging to assurance of high quality and accuracy of a surface at machining in mechanical engineering was always one of the primary and priority tasks. A considerable part of all technological operations connected with shaping falls at machining. At that the operations connected with milling occupy a rather large share of all processes of machining in a variety of production branches. In the course of the study of shaping and aspects of quality formation at machining it is established that anodic-mechanical operation can promote effectively the quality increase of aluminum surface and its alloys at turning. Unlike turning at milling it is necessary to take into account other character of the interaction of a cutter with a surface worked and also the existence of

some cutting edges which can contribute to the roughness growth at the macro-level.

A considerable influence upon quality of a surface under formation at aluminum alloy anodic milling have: materials of a work piece and a tool, technical and geometrical parameters of a tool, a milling direction, scale formation, a magnitude of current and voltage in the area of a contact of a tool and a work piece, the availability and a type of cutting emulsion (or a mixture and concentration of electrolyte), and also a way of its feed.

**Key words:** aluminum, milling, shaping, finishing, roughness, combined working, quality parameters, AMT.

### Введение

Решение проблем, относящихся к обеспечению высокого качества поверхности и точности обработки в машиностроительной отрасли, всегда являлось одной из первоочередных и приоритетных задач. Их решение является особенно актуальным в условиях постоянно возрастающих технических требований к продукции машиностроения, что обусловлено совершенство-

ванием технологий и расширением ассортимента применяемых материалов. Значительная часть всех технологических операций, связанных с формообразованием, приходится на механическую обработку. При этом операции, связанные с фрезерованием, занимают существенную долю всех процессов механообработки в самых различных отраслях производства.

### Описание составляющих профиля

По критерию достижения шероховатости к труднообрабатываемым материалам можно отнести алюминиевые сплавы. Высокая шероховатость обработанной поверхности у данных материалов связана с их основными механическими свойствами

– высокими пластичностью и ударной вязкостью, что приводит к образованию элементной стружки, значительному вытягиванию зерен металла в направлении отделения стружки и вибрации технологической системы. Однако с практической точ-

ки зрения данный вопрос решен путем увеличения скорости резания и подбора оптимального состава СОТС [1].

В процессе изучения формообразования и аспектов формирования качества при механообработке установлено, что эффективно способствовать повышению качества поверхности алюминия и его сплавов при токарных операциях может анодно-механическая обработка (АМО) [2].

По данным проф. А.Г. Сулова, профиль поверхности при лезвийной обработке характеризуется четырьмя основными составляющими [3]:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4,$$

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

### Проблемы качества

Алюминий и его сплавы по обрабатываемости можно разделить на две группы. К первой следует отнести чистый алюминий и его сплавы, не содержащие большого количества кремния (до 3-5 %). В процессе резания этих металлов износ режущих инструментов невелик. Вторая группа – это литые сплавы с относительно высоким содержанием кремния (до 9 % и выше). Твердые включения – силициды – сильно изнашивают.

Высокие скорости резания при обработке сплавов на основе алюминия могут быть применены без существенной опасности теплового повреждения инструмента, поскольку в этих случаях температура резания не настолько высока, чтобы вызвать ускоренный износ инструмента.

При высокоскоростном резании действующие на инструмент силы стабилизируются. В плоскости сдвига имеет место экстремальная скорость деформации. Подобная нестабильность обусловлена со-

пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки;  $h_4$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента.

Исследование формирования качества поверхности деталей из алюминия и алюминиевых сплавов в процессе фрезерования также подтверждает целесообразность применения АМО. При рассмотрении данного процесса закономерность формообразования может быть описана формулой

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

где  $h_5$  – величина изменения профиля шероховатости, обусловленная анодным растворением при лезвийной АМО.

В отличие от токарной обработки, при фрезеровании необходимо учитывать иной характер взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью, а также наличие нескольких режущих кромок, что может способствовать росту шероховатости на макроуровне.

четанием теплового размягчения и упрочнения материала в плоскости сдвига. Исследователи не всегда единодушны относительно механизма образования тепла в плоскости сдвига. В качестве объяснения выдвигают теорию пластической деформации, теорию дислокаций, волны напряжения, ударные процессы, динамическое разрушение или пластическое течение.

При высокоскоростном резании алюминиевых сплавов в плоскости сдвига имеют место высокие температуры. Когда температура приближается к температуре плавления металла, силы резания уменьшаются по сравнению с обработкой с обычной скоростью резания.

В целом основными проблемами при механической обработке алюминиевых сплавов являются возникновение значительных тепловых деформаций, приводящих к снижению точности получаемых деталей при сухой (без применения СОТС) чистовой обработке, а также достаточно

низкая шероховатость обработанной поверхности.

Низкая шероховатость объясняется интенсивным наростообразованием и налипообразованием при резании алюминиевых сплавов. Известно, что особенностью алюминиевых сплавов является их повышенная склонность к фрикционному переносу обрабатываемого материала на лезвие инструмента, что приводит к образованию нестабильного нароста, весьма сильно влияющего на качество обработанной поверхности [7].

Нестабильность стружко- и формообразования, связанная с отрицательным действием нароста, свойственна алюминиевым сплавам по трем причинам. Первая причина – особая роль фактора упрочнения при деформировании, присущая всем мягким сплавам. Вторая причина – высокая теплопроводность алюминиевых сплавов, что сглаживает зависимость температуры резания от скорости резания и способствует расширению диапазона режима, в котором существует нарост. Третья причина – аномально высокое соотношение механических свойств слоев окислов алюминия и алюминиевого сплава, что обуславливает отрицательный градиент механических свойств по глубине в контактной зоне в среде, содержащей окислитель.

Анализ существующих научных работ, посвященных исследованиям процессов шлифования заготовок из алюминиевых сплавов, показал, что традиционные методы шлифования вследствие мгновенного засаливания абразивного круга малоэффективны.

В процессе шлифования совершается непрерывный процесс разрушения и заглаживания поверхности. Причем локальные вырывы металла, получившиеся на предыдущих операциях, заволакиваются размягченным металлом частично или полностью на выполняемой операции. Практически микроразрушений, выхватов и надиров избежать нельзя. Поверхностный слой структурно всегда неоднороден. Также авторы многих исследований считают, что уменьшение шероховатости шлифованной поверхности может быть достигнуто различными методами, от вы-

бора или комбинации которых зависит успех в решении поставленной задачи. Но, к сожалению, до сих пор не выяснена степень влияния того или иного технологического фактора на шероховатость обработанной поверхности. Условно их можно распределить в ряд по убывающей степени влияния на уменьшение шероховатости: выхаживание – алмазная правка круга – скоростное шлифование – уменьшение величины зерен круга – варьирование режимных факторов – влияние материала связки – влияние химического состава и чистоты охлаждающей жидкости. Авторы полагают, что в этом ряду самым сильным фактором, резко уменьшающим шероховатость, влияющим на точность и шероховатость шлифованной поверхности, является выхаживание.

В целом процесс шлифования имеет ограниченное применение для обработки деталей из алюминиевых сплавов, так как в этом случае происходит быстрое засаливание абразивного инструмента и частичное оплавление обработанной поверхности.

К основным причинам труднообрабатываемости таких материалов относятся [1]:

- Значения механических свойств материалов, прежде всего предела текучести, степень склонности материала к деформационному и скоростному упрочнению (зависимость напряжения текучести от накопленной деформации и скорости деформации), значения коэффициента ударной вязкости и пластичности (при оценке по относительному удлинению), зависящие от структуры.

- Теплофизические свойства материалов, прежде всего теплопроводность, низкое значение которой приводит к значительной концентрации тепловой энергии непосредственно в зоне контакта режущего клина с заготовкой и прилегающих поверхностных слоев, что является причиной высоких значений температуры в зоне контакта поверхностей инструмента и заготовки. Именно этим определяется необходимость использовать твердосплавный режущий инструмент, имеющий высокую

теплостойкость и низкую теплопроводность.

• Адгезионный характер изнашивания режущей кромки (схватывание и эвакуация со стружкой частиц инструментального материала).

Современная обработка высокопрочных алюминиевых сплавов твердосплавным инструментом ведется на скоростях 1000-3000 м/мин.

С точки зрения легкости обработки фрезерованием, нарезания резьбы и токарной обработки алюминиевые сплавы можно разделить на две группы 9 в зависимости от состояния) [4]:

1. Мягкие и пластичные, вызывающие проблемы при обработке резанием:

- отожженные: Д16, АВ;

- не упрочняемые термической обработкой: АМц, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6.

2. Сравнительно твердые и прочные, которые достаточно просто обрабатываются резанием:

- закаленные и искусственно состаренные: Д16Т, Д16Н, АВТ;

### Обеспечение качества

Большое влияние на качество формирования поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов оказывают жесткость и точность позиционирования применяемого в операциях технологического оборудования. В настоящее время параметры качества обеспечиваются за счет применения современного высокопроизводительного станочного оборудования с числовым программным управлением. Данное оборудование позволяет 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. Достижение эффекта HSM обусловлено структурными изменениями материала в зоне отрыва стружки. Это связано с образованием пластических деформаций, происходящим с высокой скоростью. При

- ковочные: АК6, АК8, АК4-1;

- литейные: АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ8, АЛ27, АЛ1, АЛ21, АЛ33.

Если не требуется повышенная производительность, то такие алюминиевые сплавы допустимо обрабатывать стандартным инструментом. Если требуется повысить скорость и качество обработки, тогда необходимо применять специализированный инструмент.

При изучении эффективности технологии фрезерной обработки [5] установлено, что отсутствует какая-либо тесная взаимосвязь между шероховатостью и режимными параметрами обработки. Преобладающее влияние на шероховатость оказывают параметры оборудования: допустимый крутящий момент на шпинделе, мощность, жесткость. Помимо этого, при соблюдении требований к оборудованию при фрезеровании алюминиевых сплавов шероховатость обработанной поверхности может находиться в пределах Ra 0,6-0,8 мкм.

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 известен ранее. Обработка алюминия и его сплавов с помощью HSM имеет множество особенностей, связанных с характеристиками оборудования и точностью управляющих программ для HSM-траекторий. На основе многих исследований процессов обработки и HSM-программирования специалистами [6] выработаны различные рекомендации, связанные непосредственно с выбором оборудования, режимов резания, выбором и позиционированием режущего инструмента.

Кроме того, в настоящее время известно преимущество использования анодно-механической обработки [7], 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. Также известно, что при чистовых и финишных операциях анодно-механической обработки наиболее эффективны схемы резания, включающие в себя последовательное действие механической, а затем электрохимической составляющей [6; 7]. В основе данного способа обработки лежит сочетание электроконтактного взаимодействия инструмента и заготовки (ме-

ханическое разрушение или формоизменение металлических поверхностей, производимое одновременно с нагревом или расплавлением этих поверхностей электрическим током) и гальванического процесса (в данном случае это анодное растворение 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 [8]. Электроконтактная обработка может выполняться как в воздушной, так и в жидкой среде. Производительность обработки почти линейно растет с увеличением напряжения и мощности источника питания.

### Заключение

Существенное влияние 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, расположение фрезы относительно заготовки (симметричное/несимметричное фрезерование), направление фрезерования (встречное/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.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреев, С.В. Высокоскоростное фрезерование труднообрабатываемых материалов. Особенности обрабатываемости при фрезеровании / С.В. Бреев, А.Г. Серебренникова // Учёные записки. - 2013. - IV-1(16). - С. 59-64.
  2. Куликов, М.Ю. Совершенствование способа чистовой анодно-механической обработки цветных металлов и их сплавов. / М.Ю. Куликов, В.Е. Иноземцев, Д.А. Нечаев, У Мо Наинг // Научноёмкие технологии в машиностроении. - 2014. - № 11. - С. 19-22.
  3. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. - М.: Машиностроение, 2000. - С. 154.
  4. Интерактивный каталог режущего инструмента. - URL: [http://www.goodtool.ru/obr\\_mat/al.htm](http://www.goodtool.ru/obr_mat/al.htm).
  5. Грубый, С.В. Повышение эффективности технологии фрезерной обработки деталей из перспективных алюминиевых сплавов на современном оборудовании с ЧПУ / С.В. Грубый, А.М. Зайцев. - URL: <http://mt2.bmstu.ru/old/BMR2010/a2/5.pdf>.
  6. Степанов, А.В. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве / А.В. Степанов // CAD/CAM/CAE Observer, 2003. - № 4 (13). - С. 2-8.
  7. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. - М.: Высш. шк., 1974. - С. 493-498.
  8. Валетов В.А. Основы технологии приборостроения / В.А. Валетов, В.Б. Мурашко. - СПб., 2006. - С. 60-68.
- М.Ю. Куликов, В.Е. Иноземцев, Д.А. Нечаев, У Мо Наинг // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. - 2014. - № 11. - pp. 19-22.

3. Suslov, A.G. *Surface Layer Quality in Machinery* / A.G. Suslov. - M.: Mechanical Engineering, 2000. - pp. 154.
4. *Cutter Interactive Catalogue*. - URL: [http://www.goodtool.ru/obr\\_mat/al.htm](http://www.goodtool.ru/obr_mat/al.htm).
5. Gruby, S.V. Efficiency Increase in Milling Techniques of Parts Made of Promising Aluminum Alloys on Modern NC Machines / S.V. Gruby, A.M. Zaitsev. - URL: <http://mt2.bmstu.ru/old/BMR2010/a2/5.pdf>.
6. Stepanov, A.V. High-speed milling in Modern Industry / A.V. Stepanov // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2003. - № 4 (13). - С. 2-8.
7. Podurayev, V.N. *Hard-to-Machine Material Cutting* / V.N. Podurayev. - M.: Higher School, 1974. - pp. 493-498.
8. Valetov, V.A. *Fundamentals of Instrument-Making Technology* / V.A. Valetov, V.B. Murashko. - СПб., 2006. - pp. 60-68.

Статья поступила в редколлегию 11.07.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор  
Шентунов С.А.

#### 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).

**Бочаров Андрей Александрович**, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МГУПС МИИТ), e-mail: [bocharov.andrey290692@mail.ru](mailto:bocharov.andrey290692@mail.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).

**Kulikov Mikhail Yurievich**, D.Eng., Prof. of the Institute of design-technological informatics of 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" of Emperor Nikolay II State University of Communications (MSUC MIET); Member of the Lab. in the Institute of Design-Technological Informatics (IDTI RAS), e-mail: [vitalin-85@mail.ru](mailto:vitalin-85@mail.ru).

**Bocharov Andrey Alexandrovich**, Post graduate student of the Dep. "Technology of Transport Mechanical Engineering and Rolling-Stock Repair" of Emperor Nikolay II State University of Communications (MSUC MIET), e-mail: [bocharov.andrey290692@mail.ru](mailto:bocharov.andrey290692@mail.ru).

**Myo Naing Oo**, Post graduate student of the Dep. "Technology of Transport Mechanical Engineering and Rolling-Stock Repair" of Emperor Nikolay II State University of Communications (MSUC MIET); e-mail: [myonaingoo@mail.ru](mailto:myonaingoo@mail.ru).