

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article_5ba8a185b8f820.98212961

В.Е. Иноземцев, М.Г. Крукович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ

Определены критерии формирования качества поверхности при комплексных методах формообразования.

Ключевые слова: сплавы, комплексные методы обработки, шероховатость, качество поверхности, формообразование.

V.E. Inozemtsev, M.G. Krukovich

SURFACE QUALITY SUPPORT IN METAL PRODUCTS AT COMPLEX METHODS OF PROCESSING

The purpose of the work consists in the investigation of the process of the properties required and shaping control possibilities obtaining by a surface.

It is well-known that a shaping process affects a factor quantity particularly in the course of complex methods of processing. And at the same time a considerably important factor is also a preliminary state of a surface since a final result of processing depends upon a totality of all factors. The time alignment of anode dissolution process with a blade treatment and a chemical reaction process on the surface under working during processing allows forming different conditions for shaping. The study of machining conditions impact upon quality of a surface layer in parts allows defining

optimum cutting parameters and increasing operation properties of many parts.

Conclusion: surface quality is affected not only by basic factors such as tool geometry, kinematics of a tool displacement, oscillations impact due to the level of technological system rigidity, plastic deformations in a cutting area conditioned on force effects of a cutting process, tool surface roughness, cutting speed, electrolyte concentration and electric circuit voltage, processing time and a temperature in a cutting area, but also physical-mechanical properties of a near-surface layer up to finishing, and also an alignment degree of different shaping methods and their impact intensity.

Key words: alloys, complex processing methods, roughness, surface quality, shaping.

Введение

В настоящее время механическая обработка занимает существенную долю в области процессов формообразования, даже с учетом тенденции развития альтернативных методов создания деталей в отраслях машиностроения. При этом обработка металлов и сплавов сопровождается очень существенными изменениями параметров качества поверхностного слоя деталей, которые оказывают большое влияние на эксплуатационные свойства [1]. Особой проблемой выступает достижение высокого качества поверхностей при обработке цветных металлов и их сплавов, так как

такие материалы легко нагреваются при резании, процесс обработки сопровождается повышенным наростообразованием и соответственным снижением эффективности резания. Также механическая обработка алюминия и алюминиевых сплавов сопровождается нарушением сплошности структуры поверхности после обработки. Исследование комплексного воздействия факторов обработки на качество поверхностного слоя деталей позволяет установить эффективность взаимодействия различных процессов, характеризующих поверхность при формообразовании.

Исследование проблемы

Известно, что в ряде случаев одной лезвийной обработки недостаточно для достижения требуемого качества поверхности. Поэтому широко используется комбинированное воздействие на обрабаты-

ваемые металлические поверхности с целью придания им соответствующих микрорельефа и структуры. В основе комплексных способов лежат разновидности сочетаний

механической обработки, электрохимических и химических способов воздействия.

Одним из методов размерной электрохимической обработки металлов комбинированным электрохимическим и электроэрозионным воздействием электрического тока на изделие в среде электролита является анодно-механическая обработка [2]. Способ был разработан в СССР в 1943 году инженером В.Н. Гусевым. Изделие, подлежащее обработке, являющееся анодом, и инструмент, представляющий собой электрод, называемый катодом, подключаются, как правило, в цепь постоянного тока низкого напряжения, то есть в сеть напряжением до 30 В. Электролитом служит водный раствор силиката натрия Na_2SiO_3 (жидкого стекла), иногда добавляются соли других кислот. В качестве материалов для электродов-инструментов применяют малоуглеродистые стали. Под действием электрического тока металл на поверхности заготовки начинает растворяться, при этом на самой поверхности образуется нерастворимая пассивирующая пленка из продуктов растворения металла, которая удаляется с помощью лезвийного инструмента. В роли такого инструмента может быть движущийся металлический катод или инструмент, не включенный в электрическую цепь, то есть условно нейтральный. При увеличении давления инструмента на изделие пленка разрывается и возникает электрический разряд, и его тепловое действие вызывает местное расплавление металла. Образующийся шлам выбрасывается движущимся инструментом. Изменяя электрический режим и давление, можно получить изделия с различной шероховатостью поверхности, вплоть до девятого класса чистоты. Известны две основные разновидности анодно-механической обработки: чистовая, съём металла при которой происходит в результате сочетания электрохимического действия тока и механического воздействия, и черновая, при которой наряду с механическим воздействием играют значительную роль электротермические явления - выделение тепла в точках соприкосновения электродов. При чистовой обработке механическое удале-

ние продуктов растворения может производиться любым электрически нейтральным инструментом, движущимся с большой скоростью потоком электролита или перемещающимся катодом. При черновой обработке необходимое механическое воздействие производится только движущимся катодом.

Работа по съему металла при анодно-механической обработке осуществляется электрическим током в межэлектродном зазоре почти без силовой нагрузки на узлы анодно-механического станка. В этом и заключается принципиальное отличие анодно-механической обработки от способа удаления металла в металлорежущих станках, в которых узлы сильно нагружены. Интенсивность съема металла практически не зависит от механических свойств обрабатываемых металлов и инструмента (твердости, вязкости, прочности), поэтому анодно-механический метод целесообразно применять для обработки изделий из высоколегированных сталей, твердых сплавов. Применение анодно-механического метода для обработки таких материалов позволяет увеличивать производительность, уменьшать количество отходов и расход энергии, снижать затраты на инструмент. При доводочных работах анодно-механическая обработка позволяет получить высокое качество поверхности. Анодно-механический способ обработки металлов применяют для заточивания пластинок из твердых сплавов и резки очень твердых и вязких металлов, а также для заточки резцов, шлифования [2].

Как уже было отмечено, анодно-механическая обработка подразделяется на черновую и чистовую [3]. В случае достижения требуемой чистоты поверхности наиболее целесообразно рассматривать процессы чистовой обработки, которая подразделяется, в свою очередь, на следующие виды:

1) Анодно-механическое резание. Необходим отрицательно заряженный металл и, соответственно, положительно заряженный диск, который берет на себя роль катода. Их подключают к цепи постоянного тока напряжением 30 В, а в разрезе между ними устанавливают жидкое

стекло. В качестве электродов используют малоуглеродистую сталь. Металл растворяется под действием тока. На его поверхности образуется защитная пленка. Механическая работа диска уничтожает пленку, чем обеспечивает непрерывность электрохимической реакции. Неровности катодного и анодного веществ приводят к возникновению электрических разрядов во время снятия пленки.

2) Анодно-абразивное шлифование. Катодный круг состоит из связки, наполнителя и абразивных зерен. Для высокой электропроводности добавляют графит. Может использоваться как стальной, так и медный диск. В качестве электролитов – гидроксиды калиевой и натриевой селитры с добавлением ингибиторов (замедлителей реакции) коррозии. Сравнительно теплоемкий метод. Так же как и в предыдущем случае, выступающая часть анода неровная, отчего поверхность низкошероховатая. Величина зазора и режущих зерен обусловлена силой давления круга на металл.

3) Электроалмазное шлифование. В качестве инструмента используют кольцевые сверла с алмазным слоем, который можно получить различными способами (спекание, экструзия). Для сквозных отверстий подходят тонкостенные алмазные сверла, для глухих – каналные.

4) Анодно-абразивное хонингование. Разновидность отделочной работы с применением электронейтрального инструмента. Берутся специальные хонинговальные головки, источником тока выступает низковольтный селеновый генератор. Абразив растворяет оксидный слой, что предотвращает процессы пассивирования. Металлическая деталь, обработанная этим методом, не имеет внутренних напряжений.

5) Электрохонингование. Более производительный метод по сравнению с обычным хонингованием. Принцип работы такой же.

6) Анодно-механическое полирование. Осуществляется специальным прибором – золовкой, которая вращается в обе стороны. Катод и анод соединяются мелкодисперсным порошком. Полировальни-

ки изготавливаются из дерева или пластмассы. Для электролита можно взять соляную или серную кислоту. Порошок и полировальники совместно удаляют с поверхности пленку.

7) Алмазно-катодная. Принципиальное отличие от предыдущей - в изменении полярности. Круг выступает анодом, а изделие – катодом. Благодаря непрерывному растворению анода круг не засаливается. Используется при заточке лезвий и пластин [3].

Существует множество исследований в области достижения качества поверхности при обработке металлов и сплавов [4]. Большой ассортимент применяемых в машиностроении сплавов 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.

Чистовую анодно-механическую обработку рекомендуется осуществлять при малых плотностях электрического тока [5], поэтому основное значение при её выполнении имеют механизмы анодного растворения и механического снятия плёнки движущимся инструментом. Эти процессы происходят преимущественно по вершинам микронеровностей, которые 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 [6]. В качестве электролита использовались водные растворы NaCl и NaNO₃. 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.

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. 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 (шероховатость составляет 0,5...0,58 мкм).

Также экспериментально установлено, что 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.

Представленная ранее модель формирования шероховатости обработанной поверхности при лезвийной анодно-механической обработке силуминов, основанная на уравнении А.Г. Суслова [7], описывает взаимосвязь средней высоты профиля шероховатости и его составляющих, обусловленных геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, шероховатостью рабочих поверхностей инструмента, величиной изменения профиля шероховатости, обусловленной анодным раство-

рением при лезвийной анодно-механической обработке.

В результате статистической обработки экспериментальных данных [8] модель формирования шероховатости обработанной поверхности для лезвийной анодно-механической обработки устанавливает прямую пропорциональную зависимость шероховатости поверхности Ra от концентрации электролита ω , напряжения электрической цепи U и обратную зависимость от скорости резания V.

Как видно из множества моделей формообразования, в качестве факторов влияния рассматриваются геометрия инструмента, кинематика перемещения инструмента, колебательные воздействия, обусловленные уровнем жёсткости технологической системы, пластические деформации в зоне резания, обусловленные силовыми воздействиями процесса резания, шероховатость поверхности инструмента, а также скорость резания, концентрация электролита и напряжение электрической цепи.

Также необходимо учитывать температурные колебания в зоне резания, которые зависят от времени обработки. Чем длиннее путь режущего инструмента в процессе формообразования поверхности, тем более существенный нагрев будет наблюдаться в зоне контакта инструмента с образуемой поверхностью. При этом градиент температурного поля будет тем больше, чем больше силы резания и время обработки. Таким образом, обработка заготовок большой длины с высокими скоростями будет сопровождаться более значительным нагревом главной режущей кромки инструмента, а шероховатость поверхности на выходе будет выше, чем в начале процесса резания. При этом очевидно, что изменение нагрева режущей кромки и, соответственно, обрабатываемой поверхности, контактирующей с постоянно увеличивающимся своё температурное поле инструментом, будет протекать независимо от типа обработки (механическая или комбинированная). Значит, данную переменную можно отнести к каждому слагаемому уравнения. С учётом особенностей обрабатываемости алюминия и его

сплавов были проведены экспериментальные исследования качества при формообразовании поверхности комплексным методом, сочетающим электрохимическую и

механическую обработку, а также сравнение с результатами после электрохимической обработки (рисунок).

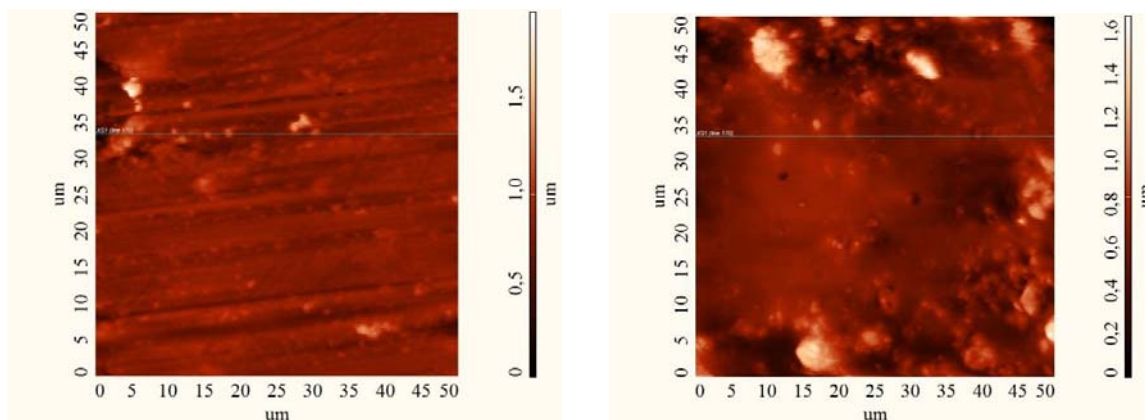


Рис. Образцы АЛ2 после гальванической обработки (слева) и электрохимической обработки (справа)

Оба образца из АЛ2 предварительно прошли фрезерную чистовую обработку, после чего один из них подвергся гальванической обработке в течение 10 мин в ванне с сульфатом алюминия ($I=0,4$ А, $U=10$ В), а второй образец был обработан с помощью комбинированного электрохимического воздействия ($I=0,6$ А, $U=18$ В, $n=1600$ об/мин, $t=0,5$ мм) с использованием сульфата алюминия. Если после гальванической обработки шероховатость поверхности R_a составила $0,07$ мкм, то после электрохимической обработки шероховатость была примерно $0,05$ мкм.

Другими исследованиями [9; 10] было доказано влияние изменения температурных полей в зоне контакта инструмента и заготовки при обработке стали 45Х на шероховатость поверхности после обработки. Так, при обработке заготовки с из-

менением скорости резания от 160 до 320 м/мин температура резания менялась соответственно от $515,3$ до 600 °С. Данные изменения сопровождались изменением шероховатости R_a поверхности после обработки от 1 до $4,2$ мкм. Как указывает автор, наблюдается тенденция увеличения значений шероховатости R_a в зависимости от скорости резания.

Данная зависимость геометрических параметров заготовки и шероховатости обработанной поверхности вызывает необходимость оптимизации режимов обработки при точении, то есть нахождения таких режимов резания, при которых погрешность диаметра детали и параметры качества обработанной поверхности будут находиться в пределах требований технологического процесса [9].

Заключение

Как показали проведенные исследования, при комплексных методах формообразования на качество поверхности влияют не только основные факторы, такие как геометрия инструмента, кинематика перемещения инструмента, колебательные воздействия, обусловленные уровнем жёсткости технологической системы, пластические деформации в зоне резания, обусловленные силовыми воздействиями

процесса резания, шероховатость поверхности инструмента, скорость резания, концентрация электролита и напряжение электрической цепи, время обработки и температура в зоне резания, но и физико-механические свойства приповерхностного слоя до чистовой обработки, а также степень совмещения различных способов формообразования и интенсивность их воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulikov, M.Yu. Technological method for the finishing process of fusible alloy Precision Machining VII / M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, Myo Naing Oo // Selected, peer reviewed papers from the 7th International Congress of Precision Machining. - Miskolc, Hungary, 2013. - P. 224-228.
 2. <http://megabook.ru/article>.
 3. <http://www.metobr-expo.ru/ru/articles/anodno-mehanicheskaya-obrabotka-metallov>.
 4. Boubekri, N. Machining using minimum quantity lubrication: a technology for sustainability / N. Boubekri, V. Shaikh. - URL: http://www.ijastnet.com/journals/Vol_2_No_1_January_2012/13.pdf.
 5. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. - М.: Высш. шк., 1974. - С. 469-470, 494.
 6. Иноземцев, В.Е. Обработка металлокерамики / В.Е. Иноземцев // Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении: науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. - М.: Машиностроение, 2010. - 571 с.
 7. Суслов, А.Г. Качество поверхности слоя деталей машин / А.Г. Суслов. - М.: Машиностроение, 2000. - 320 с.
 8. Мо Наинг У. Повышение эффективности лезвийной анодно-механической обработки при точении и развёртывании цилиндрических поверхностей деталей из алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук / Мо Наинг У. - М., 2016. - 146 с.
 9. Ямникова, О.А. Влияние тепловых деформаций на точностные и качественные показатели детали / О.А. Ямникова, Е.Н. Якимович // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула, 2008. - № 2. - С. 95-98.
 10. Кульков, А.А. Технологические режимы ультразвукового жидкостного матирования металлических поверхностей / А.А. Кульков // Металлообработка. - 2017. - № 6. - С. 51-53.
-
1. Kulikov, M.Yu. Technological method for the finishing process of fusible alloy Precision Machining VII / M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, Myo Naing Oo // Selected, peer reviewed papers from the 7th International Congress of Precision Machining. - Miskolc, Hungary, 2013. - P. 224-228.
 2. <http://megabook.ru/article>.
 3. <http://www.metobr-expo.ru/ru/articles/anodno-mehanicheskaya-obrabotka-metallov>.
 4. Boubekri, N. Machining using minimum quantity lubrication: a technology for sustainability / N. Boubekri, V. Shaikh. - URL: http://www.ijastnet.com/journals/Vol_2_No_1_January_2012/13.pdf.
 5. Poduraev, V.N. *Hard-to-Machine Material Cutting* / V.N. Poduraev. - M.: Higher School, 1974. - pp. 469-470, 494.
 6. Inozemtsev, V.E. Metal-ceramic processing / V.E. Inozemtsev // *Fundamental problems and Modern Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of the Inter. Scientific Pract. Conf.* - M.: Mechanical Engineering, 2010. - pp. 571.
 7. Suslov, A.G. *Surface Layer Quality of Machinery* / A.G. Suslov. - M.: Mechanical Engineering, 2000. - pp. 320.
 8. Mo Naing U. Efficiency increase of blade anodemachining at turning and reaming cylindrical surfaces in aluminum alloy parts: *Thesis for Can. Sc. Tech. Degree* / Mo Naing U. - M., 2016. - pp. 146.
 9. Yamnikov, O.V. Thermal deformation impact upon precision and quality indices of parts / O.A. Yamnikov, E.N. Yakimovich // *Transactions of TulaSTU. Engineering Sciences.* - Tula, 2008. - No.2. - pp. 95-98.
 10. Kulkov, A.A. Technological modes of metal surface ultrasonic liquid matting A.A. Kulkov // *Metallworking.* - 2017. - No. 6. - pp. 51-53.

Статья поступила в редакцию 21.06.18.

Рецензент: научный сотрудник
Российского университета транспорта (МИИТ)
Лыткин Д.Н.

Статья принята к публикации 25.07.18.

Сведения об авторах:

Иноземцев Виталий Евгеньевич, к.т.н., Институт конструкторско-технологической информатики РАН, Российский университет транспорта (МИИТ), e-mail: vitalin-85@mail.ru.

Inozemtsev Vitaly Evgenievich, Can. Sc. Tech., Institute of Design Technological Informatics of RAS, Russian University of Transport (MIET), e-mail: vitalin-85@mail.ru.

Крукович Марат Григорьевич, д.т.н., Российский университет транспорта (МИИТ), e-mail: bormag@miit.ru.

Krukovich Marat Grigorievich, Dr. Sc. Tech., Russian University of Transport (MIET), e-mail: bormag@miit.ru.