



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.7.019.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-25-35>

Удаление заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей для сверхвысокочастотной электроники

© Ю.И. Карлина, Д.А. Журавлев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – определение ограничений при выборе материалов для изготовления деталей коаксиальных радиокомпонентов для сверхвысокочастотной микроэлектроники, выявление особенностей и проблем при их изготовлении, исследование применяемых способов решения проблемы возникновения и удаления заусенцев, выбор перспективных методов удаления заусенцев для осуществления экспериментов и оценки эффективности их применения. Проведены описание особенностей технологии изготовления деталей радиокомпонентов для сверхвысокочастотной электроники, классификация номенклатуры деталей по геометрии и используемым материалам для выбора метода борьбы с заусенцами, описание и сравнение результатов применения опробованных методов удаления заусенцев с деталей, изготавливаемых из материалов 29НК и бериллиевой бронзы на токарных автоматах продольного точения, а также сделан подбор перспективных методов удаления заусенцев для дальнейшего исследования. Качественное удаление заусенцев с деталей, изготавливаемых из материалов 29НК и бериллиевой бронзы на токарных автоматах продольного точения (не имеющих труднодоступных поверхностей), достигается применением «галтовки с подбором абразивной среды». Качественное удаление заусенцев с деталей, изготавливаемых из материалов 29НК и бериллиевой бронзы на токарных автоматах продольного точения, имеющих труднодоступные поверхности (пазы, карманы, боковые отверстия, канавки, резьбы и т.п.) можно получить при помощи робота для зачистки, устанавливаемого на каждый станок, галтовки с подбором абразивной среды с последующей ручной слесарной операцией, термическим устранением заусенцев, а для материала 29НК – посменной заменой подобранного режущего инструмента для чистовой обработки. Недостаточно исследованы такие перспективные методы удаления заусенцев на данном производстве как автоматизация слесарной обработки с применением робота, термическое устранение заусенцев, подбор инструмента и режимов обработки по каждому виду материалов с учетом конструкции деталей.

Ключевые слова: удаление заусенцев, финишная обработка, малогабаритные детали, труднодоступные внутренние поверхности, продольное точение, автоматизация слесарной обработки

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-901184.

Информация о статье: Дата поступления 25 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 26 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Карлина Ю.И., Журавлев Д.А. Удаление заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей для сверхвысокочастотной электроники. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 25–35. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-25-35>

Deburring of small high-precision parts for ultra high frequency electronics

Yuliya I. Karlina, Diomid A. Zhuravlev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to identify the limitations when selecting materials for the production of coaxial radio component parts for ultra-high-frequency microelectronics, to reveal the features and problems in their manufacturing, to study the methods used to solve the problem of burr formation and removal, to choose promising deburring methods for experiment setting and evaluation of their effectiveness. The article describes the features of the manufacturing technology of radio component parts for ultra-high-frequency electronics, gives part assortment classification by geometry and used materials for the selection of a deburring method. It also describes and compares the application results of proven deburring methods on parts made from 29NK (29HK) and beryllium bronze on longitudinal turning machines. Promising deburring methods are selected for further research. High-quality deburring of parts made of 29NK and berylli-

um bronze materials and having no hard-to-reach surfaces on longitudinal turning machines is achieved by using "tumbling with the selected abrasive medium". High-quality deburring of parts made of 29NK and beryllium bronze materials and having hard-to-reach surfaces (slots, pockets, side holes, grooves, threads, etc.) on longitudinal turning machines can be performed through the use of a cleaning robot installed on each machine-tool, tumbling with abrasive medium selection followed by manual benchworking, thermal removal of burrs, and for 29NK material - by orderly changing of the selected cutting tool for finishing treatment. The following promising methods including benchwork automation with the use of a robot, thermal deburring, selection of tools and processing modes for each type of material taking into account the design of parts have not been sufficiently studied.

Keywords: deburring, finishing, small parts, hard-to-reach inner surfaces, longitudinal turning, automation of metal processing

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project no. 19-38-901184.

Information about the article: Received November 25, 2019; accepted for publication December 26, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Karlina YI, Zhuravlev DA. Deburring of small high-precision parts for ultra high frequency electronics. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):25–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-25-35>

1. ВВЕДЕНИЕ

Импортозамещение электронной компонентной базы является одним из перспективных направлений развития предприятий радиоэлектронной промышленности. Коаксиальные радиокомпоненты для сверхвысокочастотной (СВЧ) микроэлектроники, такие как соединители, СВЧ-вводы, фильтры помех, низкочастотные вводы и стойки являются частью электронной компонентной базы. Техника передачи сигналов без искажений и потерь с микрополосковой линии на радиочастотный кабель или другую линию подвода напряжений питания и управляющих сигналов, фильтрации помех имеет важнейшее значение в современной радиоэлектронной аппаратуре.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является определение ограничений при выборе материалов для изготовления деталей коаксиальных радиокомпонентов для СВЧ-микроэлектроники, выявление особенностей и проблем при их изготовлении, исследование применяемых способов решения проблемы возникновения и удаления заусенцев, выбор перспективных методов удаления заусенцев для проведения экспериментов и оценки эффективности их применения.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электромагнитное поле в коаксиальной линии находится между внутренним и наружным проводниками. При передаче сигнала по этим проводникам в тонком приповерхностном слое протекают токи. Требуемую для снижения в 2,71 раза амплитуды электромагнитной волны толщину слоя металла называют глубиной «скин-слоя». Чем выше частота и больше электропроводность и магнитная проницаемость металла, тем меньше глубина «скин-слоя». Токи протекают по наружному слою внутреннего проводника и по внутреннему слою наружного проводника. Глубина «скин-слоя» обуславливает выбор состава и толщины покрытия. Для СВЧ-техники необходимо покрыть проводники слоем серебра или золота толщиной несколько микрометров, чтобы обеспечить протекание поверхностного тока по хорошо проводящему слою и снизить потери в линии передачи. При этом для большинства случаев предпочтительнее золото, т.к. оно (в отличие от серебра) не окисляется.

Основные детали радиокомпонентов для СВЧ-электроники – это внутренний и наружный проводники и изолятор между ними. Для герметичных соединителей корпуса изготавливают из сплава 29НК или стали 15Х25Т для получения согласован-



ных по величине коэффициентов термического расширения сплав со стеклом С52-1; соединителей с нерегламентированной герметичностью корпуса изготавливают из нержавеющей стали или бериллиевой бронзы для изделий военного назначения, из латуни – для дешевых коммерческих соединителей [1].

Для изготовления внутренних проводников применяют латунь или бериллиевую бронзу, а для герметичных соединителей внутренний проводник (как и корпус) должен образовывать надежный сплав со стеклянным изолятором, с этой целью используют сплав 29НК. Гнездовой контакт соединителей должен быть достаточно упругим и обладать высокой электропроводностью. Эти свойства удачно сочетает бериллиевая бронза.

Внутренний и наружный проводники имеют требования высокой точности размеров (10–50 мкм) и чистоты поверхности – заусенцы не допускаются.

Гнездовые контакты выпускают из бериллиевой бронзы из-за ее упругости. После механообработки (токарной и резки прорезей между ламелями) бериллиевую бронзу закаляют, и она становится пластичной, что позволяет обжать ламели гнезда.

Для снижения прямых потерь СВЧ, обеспечения паяемости и коррозионной стойкости внутренний и внешний проводники изготавливают с гальваническим покрытием. Толщина покрытия должна быть в несколько раз больше глубины «скин-слоя». Лучшим покрытием является износостойкое золото: сплавы золота с кобальтом, никелем и сурьмой. Гальваническое покрытие сплавом золото-кобальт образует твердое (микротвердость на менее 1863 Н/мм²) износостойкое покрытие с низким контактным сопротивлением (0,4 мОм) [2]. Толщина покрытия – не более 2–3 мкм.

В рамках данного исследования проведены описание особенностей изготовления деталей радиокомпонентов для СВЧ-электроники, классификация номенклатуры деталей для выбора метода борьбы с заусенцами, описание и сравнение

результатов применения опробованных методов удаления заусенцев с деталей, изготавливаемых из материалов 29НК и бериллиевой бронзы, а также проведен подбор перспективных методов удаления заусенцев для дальнейшего исследования.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности технологии изготовления деталей радиокомпонентов для СВЧ-электроники. Внутренние и наружные проводники выпускают на высокоточных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) или часовых станках с последующим гальванопокрытием. В редких случаях наиболее элементарные токовыводы изготавливают малозатратным способом – штамповкой. Многие изделия, имеющие одни и те же технические характеристики, требуется выпускать в другом исполнении с учетом присоединительных размеров, используемых конкретными разработчиками радиоэлектронной аппаратуры.

С целью применения типовых технологических процессов номенклатура изделий, выпускаемых на станках с ЧПУ Иркутским релейным заводом (АО «Иркутский релейный завод»), подразделяется на группы в зависимости от геометрии выпускаемых изделий и применяемых материалов. В зависимости от геометрии изделия могут выпускаться на токарных (тела вращения) и фрезерных станках, а также детали без внутренних поверхностей (заусенцы удаляются путем галтовки – это технологический процесс механической обработки деталей при перемешивании с наполнителем, который может содержать абразив, применяется для обработки – от шлифовки до финишной полировки – поверхности деталей из различных материалов, металлов, сплавов черных, цветных и драгоценных, полимеров, стекла, керамики, минералов, дерева и др.) и имеющие внутренние поверхности (заусенцы удаляются путем галтовки только с внешних поверхностей). По используемым материалам номенклатура

разделяется на классы исходя из обрабатываемости материала на станках ЧПУ (наличие заусенцев, их характер, способы устранения, износостойкость инструмента).

Из номенклатуры изделий, выпускаемых на токарных автоматах продольного точения, можно выделить две большие группы изделий (детали), имеющих одинаковые особенности и проблемы:

- изготавливаемые из бериллиевой бронзы, имеющие пазы, карманы, боковые отверстия, канавки, резьбы и т.п. (например, корпус КАПД.724212030-02);
- изготавливаемые из железоникелевого сплава 29НК, имеющие пазы, карманы, боковые отверстия, канавки, резьбы и т.п. (например, втулка ФИМД.713.751.004).

Качество поверхности деталей

во многом обеспечивает получение высокопроводящего поверхностного слоя необходимой толщины и его сохранение при сборке, что влияет на потребительские качества изделия радиоэлектронной аппаратуры. Основным дефектом поверхности при изготовлении этих деталей являются заусенцы, которые не допускаются по технической документации. Заусенцы – это излишки материала, выступающие на кромках и углах поверхностей детали, в виде гребенок с рваными краями толщиной более 0,01 мм, образующиеся в результате сдвига металла при штамповке и обработке резанием. Признанным определением заусенца является определение проекта международного стандарта. Заусенец – пластически деформированный материал, образованный на кромках детали в результате обработки резанием или резки (вырубки). Заусенец включает весь металл, выступающий за теоретическое пересечение двух поверхностей, которые прилегают к заусенцу. В некоторых случаях заусенец находится внутри теоретического пересечения, он может быть острым, рваным, прочно закрепленным или свободно висящим выступом, иметь выпуклость материала на кромке [3]. Недостаточная подготовка поверхности деталей перед нанесением покрытия (заусенцы, острая кромка, нали-

чие загрязнений) приводит к ухудшению адгезии, образованию наростов на поверхности деталей [4]. Анализ исследований различных ученых показал, что образование заусенцев происходит вследствие пластической деформации впереди зоны резания обычно в двух направлениях одновременно – главного движения и подачи [3].

Подбор инструментов и параметров обработки для деталей из бериллиевой бронзы показал, что заусенцы на этих деталях появляются сразу даже при использовании нового высококачественного инструмента и оптимальных режимах обработки. Износостойкость инструмента для деталей из бериллиевой бронзы высокая. Эти детали обязательно идут на дополнительную обработку: галтовка (очищает от заусенцев наружные поверхности) и слесарная операция (зачистка шабером внутренних поверхностей, пазов, карманов и т.п.). Материал достаточно легко обрабатывается при зачистке.

Подбор инструментов и параметров обработки для деталей из железоникелевого сплава 29НК показал, что заусенцы на этих деталях появляются не сразу. При установке нового инструмента заусенцы отсутствуют примерно 12 ч работы станка. Имеется статистика зависимости качества деталей из материала 29НК от износа инструмента, которая показала, что время работы станка до появления заусенцев на деталях имеющейся номенклатуры при оптимальных режимах обработки составляет от 12 до 14 ч. Если через 12 ч менять инструмент, то дополнительная обработка не требуется, но инструмент остается практически не изношен и может использоваться для изготовления деталей из более мягких материалов или деталей, не имеющих внутренних поверхностей. При дальнейшей обработке без смены инструмента требуется дополнительная обработка: галтовка (очищает от заусенцев наружные поверхности) и слесарная операция (зачистка шабером внутренних поверхностей, пазов, карманов и т.п.). Заметим, что материал трудно обрабатывается при зачистке.



5. СПОСОБЫ УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ И ИХ ПРИМЕНИМОСТЬ В УСЛОВИЯХ ДАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В условиях производства компонентов для СВЧ-электроники возможно применение различных способов удаления заусенцев: химическое вытравливание, галтовка, термическое устранение заусенцев, электрохимическое устранение заусенцев, слесарная операция, установка на станок стальных или керамических щеток, подбор режущего инструмента, использование роботов для зачистки. Применяемые для этой цели процессы галтовки, анодно-абразивный, химический, электроконтактный способы обработки имеют целый ряд недостатков, таких как конструктивная сложность исполнения, низкая эффективность, отсутствие возможности обрабатывать диэлектрические материалы и др.¹ [5–11]. Применение того или иного способа имеет разные стоимость, время и качество обработки [12–15].

В литературных источниках описаны финишные методы обработки в среде свободных абразивов.

1. Обработка сложных фасонных поверхностей и отверстий деталей воздушно-абразивными или воздушными жидкостно-абразивными струями [4, 6, 15].

2. Ударная обработка дробеструйным, пескоструйным, гидropескоструйным и гидрокавитационным методами [4].

3. Воздействие на порцию абразивного материала встречно-направленными спиралевидными потоками сжатого воздуха при обработке внутренних поверхностей, при котором абразивный материал начинает вращаться и образует кольцевой поток обрабатывающих струй. Сжатый воздух направляется спиралевидно вдоль обрабатываемых поверхностей в одну сторону и одновременно с этим изменяется противоположно по фазе интенсивности потока энергоносителя [4].

4. Ультразвуковое удаление кристаллами льда. Данный процесс ведется с применением ультразвуковых волн. В качестве технологической среды применяются кристаллы льда, непрерывно подающиеся с технологической жидкостью в течение всей обработки, размер кристаллов применяется равным 0,08–0,18 мм. Также температура технологической жидкости (например, воды) поддерживается в диапазоне (+1...+3)°C [4].

5. Анодно-абразивный способ, обработка ведется в среде электролита и абразивного наполнителя, которые находятся во вращающемся цилиндрическом барабане, где также размещен электрод. Данный способ обладает рядом недостатков: конструктивная сложность установки, обработка не токопроводящих материалов невозможна [4].

6. Обработка гранулами в рабочей камере, создаваемой внутри отверстия, под давлением. В обрабатываемое отверстие детали помещают гранулы между двумя уплотнителями, образуя, таким образом, рабочую камеру, посредством уплотнителей рабочую среду сжимают (1–2 МПа). После этого ее перемещают вдоль оси канала обрабатываемой поверхности, вместе с этим технологической среде сообщают амплитудные колебания и силовые импульсы, что дает возможность обрабатывать детали переменного сечения по длине, а также имеющие форму эллипса в поперечном сечении [4].

7. Центробежная обработка внутренних поверхностей мелкогабаритных деталей в контейнерах с планетарным вращением, в частности, для полирования стенок каналов втулок, колец, труб [4, 9]. Для данной обработки применяют контейнер, которому сообщается планетарное вращение вокруг параллельных осей в противоположных направлениях. Технологическая среда загружается внутрь канала обрабатываемых деталей, закрываемых с од-

¹Кобчиков В.С., Кудрявцев В.Н., Коротких М.Т., Никифоров В.И., Радкевич М.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки и технологии в машиностроении: учеб. пособ.: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2017. 602 с.

ной стороны технологической заглушкой. Перед обработкой детали устанавливаются радиально в посадочные гнезда контейнера с жесткой фиксацией и наклоном к оси собственного вращения контейнера, обеспечивая циклическое осевое перемещение рабочей среды вдоль обрабатываемых поверхностей канала.

8. Многократное прокачивание возвратно-поступательным движением абразивной массы под давлением 1,5–15 МПа через каналы в деталях [4]. С целью повышения качества обработки направляющий элемент берут с отверстиями, плавно расширяющимися от торцовых поверхностей.

9. Подача абразивных зерен на обрабатываемые поверхности с помощью приспособления, вращающего периферийные лопатки для подбора и подачи абразивной среды на поверхность [4].

10. Струйно-абразивная обработка на основе вихревого закручивания потока суспензии позволяет увеличить тангенциальные составляющие скорости движения струи, что дает возможность повысить производительность процесса [4, 6, 15].

11. Заполнение отверстия детали жидкостью, имеющей свойство затвердевать в магнитном поле с последующим отведением вместе со стружкой в сборник [4].

12. Магнитоабразивная обработка отверстий, при которой в зазор между отверстием и индуктором помещают ферроабразивный порошок и приводят устройство магнитоабразивной обработки во вращение вокруг собственной оси и в планетарное движение. Индуктору также придается осевое колебательное движение [4].

13. Вибрационная обработка, при которой абразивные частицы совершают колебательное движение в вибрирующем станке одновременно с обрабатываемыми деталями [4, 10].

14. Центробежно-ротационная отделочно-зачистная обработка отверстий, основанная на формировании тороидального потока абразивных частиц. Технологическая среда вместе с обрабатываемыми заготовками совершает спиралевидное движение. Характерной чертой центробежно-

ротационной обработки является то, что частям технологической массы рабочего резервуара, которая контактирует с вращающимся дном, сообщается дополнительное движение частиц относительно заготовок путем периодического реверсивного движения дна станка в течение цикла обработки [4, 9].

Известен метод электрохимической обработки, представляющий собой анодное растворение заусенца в среде поточного электролита под действием электрического тока. В технической литературе описаны два способа выполнения электрохимической очистки поверхностей:

- полное вытравливание заусенца, начиная с головки;

- вытравливание корня заусенца неподвижным электродом.

Электрохимическая обработка корпусных деталей штуцерной аппаратуры, имеющих внутренние каналы описана в¹ [7].

Метод финишной обработки абразивными щетками применяют для более крупных деталей, в частности, авиационные детали простой формы обрабатывают с помощью автоматических щеточных стационарных установок [17].

Для автоматизации слесарной обработки применяют робототехнические комплексы для удаления заусенцев, например, промышленный робот KUKAKR210 R2700 prime с дополнительной седьмой линейной осью, позволяющей увеличить рабочую зону робототехнического комплекса и повысить производительность обработки [16, 18].

Термоимпульсное устранение заусенцев является альтернативным абразивной обработке поверхностей методом устранения заусенцев и скругления кромок; с помощью установки Pulsar TI-576 позволяет снять заусенцы с металлических деталей любого профиля с использованием термического кратковременного импульса, за счет которого происходит снятие тепловой волной недостатков механической обработки [19–21]. Исследованы следующие способы борьбы с заусенцами:



– химическое вытравливание – удаляются тонкие заусенцы, широкие – нет;

– галтовка – удаляет заусенцы только с внешних поверхностей, подобран комплект шампунь-концентрат OTEC SC96 и наполнители – гранитные гранулы GRA 2-5 или керамические пирамиды разных размеров, например, OTEC D2S4*4, используемые в зависимости от материала;

– электрохимическое устранение заусенцев – не опробовано, но известно, что если химическое устранение (вытравливание) не удаляет крупные заусенцы, а только сглаживает, то и электрохимическое (тот же реагент – кислота воздействует в гальванической ванне) добавит только проникновение на внутренние поверхности, но не улучшит результат;

– слесарная операция – зачистка шабером, бормашиной, абразивными кругами на резиновой связке – дополнительная ручная операция, дает хороший результат, повышенные трудоемкость и временные затраты;

– установка на станок стальных щеток – не все заусенцы зачищает, установка абразивных кругов на резиновой связке – круги разрушаются под воздействием смазочно-охлаждающей жидкости, установка керамических щеток – не опробовано;

– подбор режущего инструмента – опробован инструмент около 30 производителей, наилучший результат у швейцарских инструментов «UTILIS», «Fraisal».

На предприятии имеются три типа галтовочного оборудования:

– установка для центробежной галтовки MF 5-2 – роторная – используют для более грубой обработки среднегабаритных деталей;

– машина галтовочная барабанная реверсная – используют для галтовки малогабаритных деталей из материалов 29НК и бериллиевой бронзы;

– вибрационная галтовочная машина – не используют для обработки деталей коаксиальных радиокомпонентов для СВЧ-микроэлектроники.

Успешно удаляются заусенцы с наружных поверхностей деталей из мате-

риалов 29НК и бериллиевой бронзы при помощи галтовки, которая производится в галтовочной машине барабанного типа в 3 этапа:

– мокрое шлифование (грубое) керамическими призмами белыми GA – 10·10 (средняя агрессивность) в течение 1 ч;

– мокрая полировка (тонкая обработка) GA – 10·10 керамическая призма белая в течение одного часа;

– мокрое шлифование (финишная обработка – в сущности, тонкая полировка за счет круглой формы наполнителя) гранулами GA Ф 4 мм фарфора круглого в течение 1 ч.

На всех этапах используют шампунь Super Compound AL фирмы «ОТЕС» или шампунь Super Compound Fe этой же фирмы с антикоррозийными добавками.

Крупные наполнители размером 10·10 мм позволяют бережно выровнять поверхность, не повреждая ее, но не могут обработать пазы, карманы, боковые отверстия, канавки, резьбы и т.п.

Сложноудаляемые заусенцы на внутренних поверхностях удаляют тонким шабером, а при опасности повреждения поверхности детали обрабатывают маникюрными металлическими фрезами до выравнивания поверхности.

Не исследованы в условиях данного производства (применяемые на подобных разработках) такие методы устранения заусенцев как автоматизация слесарной операции – установка робота для зачистки [16–19], термическое удаление заусенцев [20, 21]. Малые размеры деталей обуславливают необходимость установки робота для зачистки на каждый станок для проведения обработки в рамках одной операции. Проведение экспериментального удаления заусенцев термическим способом или применением роботов для зачистки позволит оценить получаемое качество поверхности деталей. При получении удовлетворительных результатов эксперимента можно рекомендовать внедрение этих методов в производство, их применение позволит сократить время изготовления деталей, т.к. только на отделочно-абразивную обработку

в галтовочном барабане уходит 3 ч на каждую партию, а также снизить трудоемкость за счет исключения ручной слесарной операции по зачистке внутренних поверхностей.

Итак, качественное удаление заусенцев с деталей, имеющих труднодоступные поверхности, можно получить путем применения робота для зачистки, устанавливаемого на каждый станок, галтовки с последующей ручной слесарной операцией, термическим устранением заусенцев, а для материала 29НК – посменной заменой подобранного режущего инструмента для чистовой обработки. Применение роботов для зачистки и термическое устранение требуют дополнительных капиталовложений, целесообразность которых должна рассчитываться индивидуально и зависит от планируемых объемов выпуска продукции с их помощью. Галтовка с последующей зачисткой шабером вручную повышает трудоемкость и опасна срывом сроков изготовления. Посменная замена режущего инструмента значительно повышает расходы на инструмент. Возможно дальнейшее использование инструмента, отработавшего на материале 29НК до появления заусенцев, для производства деталей из других материалов. Для деталей, изготавливаемых из 29НК, целесообразно продолжить подбор инструмента, исследовать характер его износа, возможные способы снижения износа и восстановления приборов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наружный и внутренний проводники для СВЧ-электроники изготавливают преимущественно из сплава 29НК для герме-

тичных соединителей и бериллиевой бронзы для негерметичных соединителей. Эти детали имеют требования высокой точности размеров (10–50 мкм) и чистоты поверхности – заусенцы не допускаются. Производство таких малогабаритных высокоточных изделий из труднообрабатываемых материалов требует применения особых технологий изготовления и соответствующего оборудования. Требуется оснащение производства высокоточными станками с ЧПУ, а также дополнительным оборудованием для устранения заусенцев. Для выбора дополнительного оборудования для устранения заусенцев и оценки эффективности его применения необходимо провести дополнительное исследование и провести эксперимент по удалению заусенцев термическим способом и использованием роботов для зачистки. При недостаточном оснащении производства оборудованием для устранения заусенцев возможно включение дополнительной обработки путем галтовки с последующей ручной зачисткой шабером. Посменная замена режущего инструмента значительно повышает себестоимость деталей, изготавливаемых из 29НК. Основные мероприятия по снижению расходов на инструмент – подбор инструмента, исследование характера его износа, возможных способов снижения износа и восстановления инструмента, применение алгоритмов подбора оптимальных маршрутов изготовления деталей на участке с возможностью комбинирования зачистки деталей, перерасхода инструмента без ручной зачистки и использования инструмента, отработавшего на 29НК для обработки других материалов.

Библиографический список

1. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Соединители, коаксиально-микрополосковые переходы, адаптеры, СВЧ-вводы, низкочастотные вводы, изоляционные стойки, фильтры помех. М.: Техносфера, 2006. 216 с.
2. Сторублев М.Л. Управление качеством электролитических процессов нанесения металлических покрытий // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: материалы I Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. (г. Курск, 22–23 мая 2009 г.). Курск: Изд-во КурскГТУ, 2009. Ч. 2. С. 85–88.
3. Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Федоров А.В. Исследование процесса удаления заусенца при вибрационной обработке деталей радиоэлектронной аппаратуры // Вестник современных технологий. 2019. № 3. С. 41–46.
4. Тамаркин М.А., Смоленцев Е.В., Колганова Е.Н.



Анализ современного состояния финишных методов обработки в среде свободных абразивов деталей, имеющих малые пазы и отверстия // Вестник Воронежского Государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 122–129. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019>

5. Kadivar M.A., Akbari J., Yousefi R., Rahi A., Nick M.G. Investigating the effects of vibration method on ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composites // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2014. Vol. 30. Issue 3. P. 344–350. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04155-6>

6. Joon Kyu Beom, Young Gwan Kim, Kwang Joon Kim, Kwon Hee Kim. Study on the deburring of intersecting holes with abrasive flow machining // *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*. 2019. Т. 36. № 2. С. 163–168. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.2.163>

7. Гонибесова Е.В., Коротких М.Т. Электрохимическое удаление заусенцев с мелких деталей в условиях автоматизированного производства // Неделя науки СПбПУ. Лучшие доклады: материалы науч. конф. с междунар. участием (г. Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2018 г.). Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2018. С. 106–110. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/18-186>

8. Пермяков А.Г., Шастин В.И., Каргапольцев С.К., Лившиц А.В., Лгалов В.В. Удаление заусенцев с поверхности деталей коммутационного оборудования в высокоинтенсивном ультразвуковом поле // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 62. № 2. С. 33–40. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2\(62\).33-40](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).33-40)

9. Bordonas A.D., Leroux M., Kheyfets V.O., Yu-An Wu, Chia-Yuan Chen, Finol E.A. Computational Fluid Dynamics Modeling of the Human Pulmonary Arteries with Experimental Validation // *Annals of Biomedical Engineering*. 2018. Vol 46. Issue 9. P. 1309–1324. <https://doi.org/10.1007/s10439-018-2047-1>

10. Kadivar MA, Akbari J, Yousefi R. Investigation of ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composite with Taguchi method. // *Key engineering materials*. 2012. Vol. 523–524. P. 215–219. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.215>

11. Шастин В.И., Коновалов Н.П. Технологическое обеспечение процессов лазерного модифицирования поверхностей конструкционных сплавов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 163 с.

12. Li Hongtao, Kan Jinfeng, Jiang Bailing, Liu Yanjie, Liu Zheng. Study of the Deburring Process for Low Carbon Steel by Plasma Electrolytic Oxidation // *Plasma Science and Technology*. 2016. Vol. 18. No. 8. P. 860–864. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/8/12>

13. Valiev R.I., Khafizov A.A., Shakirov Y.I., Sushchikova A.N. Polishing and deburring of machine parts in plasma of glow discharge between solid and liquid electrodes // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2015. Vol. 86. P. 012026. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/86/1/012026> (11.03.2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/86/1/012026>

14. Сухихина Е.В., Ермаков М.А. Шастин В.И. Ультразвуковое кавитационное удаление заусенцев с поверхности малогабаритных деталей // Молодой ученый. 2018. № 9. С. 53–54. (In Russ.) [https://doi.org/2072-0297.2018.9\(195\).53-54](https://doi.org/2072-0297.2018.9(195).53-54)

15. Kwon Byeong Chan, Kim Kwon Hee, Ko Sung Lim. New abrasive deburring method using suction for micro burrs at intersecting holes // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 65. Issue 1. P. 145–148. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.085>

16. Sidorova A.V., Semyonov E.N., Belomestnykh A.S. Robotic edge machining using elastic abrasive tool // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018. Vol. 327. P. 022097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022097>

17. Чапышев А.П., Иванова А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1–5. С. 1627–1634. (In Russ.)

18. Ivanova A.V., Belomestnykh A.S., Semenov E.Yu., Ponomarev B.B. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details // *International Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 7. No. 5. P. 1774–1780.

19. Foit K., Gwiazda A., Banas W., Sekala A., Hryniewicz P. Object as a model of intelligent robot in the virtual workspace // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series: Modern Technologies in Industrial Engineering*. 2015. Vol. 95. P. 012108. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/95/1/012108> (15.06.2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/95/1/012108>

20. Чечета И.А., Зенин В.Л., Чечета А.Е. Изложен анализ производственных приемов для удаления заусенцев фронтом пламени и дано математическое описание основных параметров // Вестник Воронежского Государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 4. С. 118–121.

21. Титов С.Н. Снятие заусенцев термоимпульсной установкой Pulsar TI-576 // Вестник научных конференций. 2016. № 12-4. С. 176–177. <https://doi.org/10.17117/cn.2016.12.04>

References

1. Dzhurinskii KB. Miniature coaxial radio components for SHF. Connectors, coaxial microstrip junctions, adapters, SHF inputs, low-frequency inputs, insulating

racks, interference filters. Moscow: Tehnosfera; 2006, 216 p. (In Russ.)

2. Storublev ML. Quality management of metal coating

electrolytic processes. *Innovacii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyah: materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Innovations, quality and service in engineering and technology: Materials of the I International scientific and practical Conference. 22–23 May 2009, Kursk. Kursk: Kursk State technical University; 2009, part 2, p. 85–88. (In Russ.)

3. Tamarkin MA, Kolganova EN, Fedorov AV. Investigation of the process of removing a burr at vibration treatment of details of radio electronic equipment. *Vestnik sovremennykh tekhnologii* = Journal of Modern Technologies. 2019;3:41–46. (In Russ.)

4. Tamarkin MA, Smolentsev EV, Kolganova EN. Analysis of the modern condition of deburring details having small grooves and holes in the media of free abrasives. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Voronezh state technical university. 2019;15(1): 122–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019>

5. Kadivar MA, Akbari J, Yousefi R, Rahi A, Nick MG. Investigating the effects of vibration method on ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composites. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2014;30(3):344–350. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04155-6>

6. Joon Kyu Beom, Young Gwan Kim, Kwang Joon Kim, Kwon Hee Kim. Study on the deburring of intersecting holes with abrasive flow machining. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*. 2019;36(2):163–168.

<https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.2.163>

7. Gonibesova EV, Korotkih MT. Electrochemical deburring of small parts in automated production. In: *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo politehnicheskogo universiteta. Luchshie doklady: materialy nauchnoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Week of Science SPbPU. The best reports: Proceedings of the scientific conference with international participation. 13–19 November 2018, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Saint Petersburg Polytechnic University; 2018, p. 106–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/i18-186>

8. Permyakov AG, Shastin VI, Kargapol'tsev SK, Livshits AV, Lgalov VV. Removal of burrs from the surface of parts of switching equipment in a high-intensity ultrasound field. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* = Modern Technologies. System analysis. Modeling. 2019; 62(2):33–40. (In Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2\(62\).33-40](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).33-40)

9. Bordones AD, Leroux M, Kheyfets VO, Yu-An Wu, Chia-Yuan Chen, Finol EA. Computational Fluid Dynamics Modeling of the Human Pulmonary Arteries with Experimental Validation. *Annals of Biomedical Engineering*. 2018;46(9):1309–1324. <https://doi.org/10.1007/s10439-018-2047-1>

10. Kadivar MA, Akbari J, Yousefi R. Investigation of ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composite with Taguchi method. *Key engineering materials*. 2012;523–524:215–219.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.215>

11. Shastin VI, Konovalov NP. Technological support for processes of structural alloy surface laser modification. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, 164 p. (In Russ.)

12. Li Hongtao, Kan Jinfeng, Jiang Bailing, Liu Yanjie, Liu Zheng. Study of the De-burring Process for Low Carbon Steel by Plasma Electrolytic Oxidation. *Plasma Science and Technology*. 2016;18(8):860–864. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/8/12>

13. Valiev RI, Khafizov AA, Shakirov YI, Sushchikova AN. Polishing and deburring of machine parts in plasma of glow discharge between solid and liquid electrodes. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2015, vol. 86, p. 012026. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/86/1/012026> [Accessed 11th March 2019]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/86/1/012026>

14. Sukhinina EV, Ermakov MA, Shastin VI. Ultrasonic cavitation deburring of small part surfaces. *Molodoi uchenyi* = Young scientist. 2018;9:53–54. (In Russ.) [https://doi.org/2072-0297.2018.9\(195\).53-54](https://doi.org/2072-0297.2018.9(195).53-54)

15. Kwon Byeong Chan, Kim Kwon Hee, Ko Sung Lim. New abrasive deburring method using suction for micro burrs at intersecting holes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2016;65(1):145–148. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.085>

16. Sidorova AV, Semyonov EN, Belomestnykh AS. Robotic edge machining using elastic abrasive tool. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018, vol. 327, p. 022097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022097>

17. Chapyshev AP, Ivanova AV. Technological capabilities of processes of mechanized finishing processing the details with the use of automatic stationary units. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj Akademii Nauk* = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014;16(1–5):1627–1634. (In Russ.)

18. Ivanova AV, Belomestnykh AS, Semenov EYu, Ponomarev BB. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details. *International Journal of Engineering and Technology*. 2015;7(5):1774–1780.

19. Foit K, Gwiazda A, Banas W, Sekala A, Hryniewicz P. Object as a model of intelligent robot in the virtual workspace. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series: Modern Technologies in Industrial Engineering*. 2015, vol. 95, p. 012108. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/95/1/012108> [Accessed 15th June 2019]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/95/1/012108>

20. Checheta IA, Zenin VL, Checheta AE. High effect machined methods for deburring by impact flame. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Voronezh State Technical University. 2012;8(4):118–121. (In Russ.)

21. Titov SN. Deburring with a Pulsar TI-576 Thermal Pulse Unit. *Vestnik nauchnykh konferentsii* = Bulletin of Scientific Conferences. 2016;12-4:176–177. (In Russ.) <https://doi.org/10.17117/cn.2016.12.04>



Критерии авторства

Карлина Ю.И., Журавлев Д.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Карлина Юлия Игоревна,
аспирант,
научный сотрудник,
Научно-исследовательская часть,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: karlinigor@mail.ru

Журавлев Диомид Алексеевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: dio@istu.irk.ru

Authorship criteria

Karlina Y.I., Zhuravlev D.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuliya I. Karlina,
Postgraduate Student,
Researcher of the Research Department,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: karlinigor@mail.ru

Diomid A. Zhuravlev,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Mechanical Engineering
Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: dio@istu.irk.ru