

УДК 621.923.74-408

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

© 2014 Н.Д. Оглезнев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 20.03.2014

Проведен анализ современного состояния технологии электроэрозионной обработки, основными задачами которого являются необходимость повышения точности и производительности процесса. Перспективы связаны с электроэрозионной обработкой интерметаллических сплавов и керамики, в том числе неэлектропроводной. Направления развития электроэрозионной обработки на современном этапе развития и в перспективе могут быть реализованы при применении новых композиционных материалов для электродов-инструментов.

Ключевые слова: *электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, качество, производительность, композиционный материал*

Современный этап развития материаловедения характеризуется появлением новых материалов с уникальными свойствами, для которых в свою очередь требуются новые технологии обработки, обеспечивающие высокое качество обработанных поверхностей и производительность. Ярким примером состояния материаловедения всегда было авиастроение, где новые материалы появлялись в первую очередь, а затем находили применение в других отраслях промышленности, в том числе и в медицине. Специалисты ВИАМ новый уровень развития авиации связывают только с принципиально новыми материалами и технологиями, так как традиционные уже исчерпали себя, и важнейшей задачей считают разработку стратегических направлений получения новых материалов для различных отраслей промышленности и технологий их обработки на долгосрочный период времени [1]. Так, новым направлением в авиадвигателестроении стало применение теплозащитных покрытий (ТЗП) на основе диоксида циркония на деталях камеры сгорания (жаровые трубы, наружный и внутренний кожухи) газотурбинного двигателя (ГТД), имеющих воздушное охлаждение, которое позволяет значительно снизить температуру на поверхности деталей, устранить местные перегревы и, таким образом, гарантировать срок службы камеры сгорания. В современных авиационных ГТД актуально использование камер сгорания с большим ресурсом, для которых конструкторами ставится задача нанесения ТЗП с толщиной теплозащитного керамического слоя 300 мкм и более. Широкое распространение находит применение керамических теплозащитных

покрытий на основе частично стабилизированного оксида циркония состава $ZrO_2 - 6-8Y_2O_3$ толщиной 0,2-1 мм, напыляемых на поверхности деталей камер сгорания, соприкасающихся с горячими газами. На внутренней поверхности жаровой трубы должно быть предусмотрено керамическое ТЗП, обладающее хорошим сцеплением с основным материалом жаровой трубы и термостойкостью [2]. Технология изготовления лопатки предусматривает высокие требования к размерам, геометрии и качеству поверхности, поэтому после нанесения покрытия требуется механическая обработка.

В авиакосмической технике начинают использовать бериллий. Низкая плотность ($d=1850 \text{ кг/м}^3$) и высокий модуль упругости ($E=290 \text{ ГПа}$) обеспечивают бериллию превосходное значение удельного модуля упругости (E/d), который в 6 раз больше соответствующих параметров для сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Испытания показали, что использование бериллия обеспечило снижение массы тормозов в 2,5 раза (по сравнению со стальными) и улучшение их энергетических характеристик. Однако его промышленное производство ограничивают сравнительно низкая пластичность и технологичность, токсичность при обработке. Недавние исследования показали приемлемую технологичность бериллиевых материалов при испытаниях на технологическую пластичность при листовой и объемной штамповке, на свариваемость при различных способах сварки и пайки, коррозионной стойкости в различных средах, обрабатываемости при точении, фрезеровании, шлифовании, электроэрозионной резке. Эти результаты дали старт для разработки техпроцессов на различные виды обработки бериллия [3].

Оглезнев Никита Дмитриевич, аспирант. E-mail: fastrex@mail.ru

Появляются новые керамические и композиционные материалы. Углерод-углеродные композиционные материалы – это новый класс конструкционных материалов, предназначенных для создания теплонагруженных деталей планера воздушно-космических и гиперзвуковых самолетов, газотурбинных двигателей, деталей сопловых блоков ракет, тормозов самолетов, оснастки для металлургической промышленности и др. Они обладают уникальной способностью сохранять высокую прочность и жесткость при температурах до 2500°C, а нанесение систем барьерных и антиокислительных покрытий обеспечивает работоспособность таких композитов и в окислительной среде. Однако механическая обработка таких материалов проблематична ввиду их высокой твердости и высокой концентрации напряжений по определенным направлениям слоистого композита [4, 5].

Если сравнить набор материалов для ГТД при переходе от второго к четвертому поколению, то заметно сокращено использование алюминиевых сплавов – с 7 до 0,3% и коррозионно-стойких сталей – с 26 до 13% за счет увеличения доли жаропрочных сплавов с 28 до 57%, а титановых сплавов – в 6 раз – с 5 до 30% [6]. Основным способом изготовления титановых изделий является литье и последующая механическая обработка. Однако способ литья титановых сплавов обладает недостатками – низкая размерная точность изготовления, так как сплавы плохо поддаются фрезерованию (титан склонен к налипанию на инструмент и задиранию, а также к окислению при нагреве); литейные свойства титана не позволяют отливать тонкостенные изделия. Кроме того, в титане растворимы практически все металлы и огнеупоры, которые ухудшают свойства титана, а фазовое превращение титана из альфа-титана с гексагональной кристаллической решеткой в бета-титан с кубической при температуре 882,5°C влечет за собой не только изменение его физических параметров, но и увеличение на 17% его объема, поэтому при механической обработке некорректно выбранным инструментом или неверном режиме обработки возможны локальные перегревы металла, сопровождаемые образованием оксида и изменением кристаллической решетки. А так как многие изделия (и в авиастроении и в медицине) имеют слоистое строение [3, 7-10], то при окислении не будет необходимого сцепления с соседним металлическим или керамическим слоем, появятся трещины и сколы. Использование при обработке титана различных карборундовых дисков и камней или алмазных головок сильно загрязняет поверхность титана, что в дальнейшем также приводит к трещинам и сколам в

керамических покрытиях [9-10]. Поэтому одним из эффективных способов изготовления заготовок из титана является электроэрозионная обработка (ЭЭО). Основным ее преимуществом является отсутствие механического контакта с инструментом [11]. Процесс обработки заключается в том, что импульсы тока расплавляют и испаряют металл, под действием гидродинамических сил рабочей жидкости частицы металла выбрасываются из зоны разрядов. Электрод, углубляясь в заготовку, создает впадину, повторяющую его форму. В отличие от механической обработки ЭЭО можно обрабатывать практически любые электропроводные материалы вне зависимости от их твердости, можно выполнять элементы сложной формы с высокой точностью обработки, например, шаблоны, калибры, режущий инструмент, гибочные штампы, а дальнейшие перспективы этого вида обработки связывают с выполнением охлаждающих каналов в лопатках турбин, карманов, переходных элементов, что очень ответственно, так как требования к геометрии проточной части лопаток очень высоки (отклонения от профиля пера 0,02-0,04 мм) и будет перспективно при изготовлении мало-размерных лопаток с тонким пером [6]. ЭЭО незаменима при изготовлении пресс-инструмента (штампов) из инструментальных труднообрабатываемых сталей [12], моделей для литья под давлением [13] благодаря высокой точности, изделий сложной формы из медицинской стали, включая мелкие отверстия диаметром 100 мкм [14, 15]. Возможна качественная электроэрозионная обработка сложных геометрических профилей, например, криволинейных лопастей крыльчатки [16], прецизионных оболочек сферической формы [17], однако существует необходимость точного расчета формы электрода, его траектории для уменьшения погрешности. Методом ЭЭО можно получать тонкостенные изделия (например, зубные коронки [18]), изделия с диаметром отверстия 0,3-1 мм и глубиной 2600 мм, а в ближайшей перспективе – и до 2900 мм [19], необходимых при выполнении отверстий малого диаметра, например, в форсунках двигателей внутреннего сгорания, лопаток турбин [19], а также для изготовления медицинских инструментов и изделий из твердых сплавов с высоким качеством поверхности (шероховатостью Ra 0,03 мкм) [20, 21].

При ЭЭО титановых сплавов существует проблема сильной зависимости целостности обрабатываемой поверхности от тока и продолжительности импульса, например, в сплаве Ti6Al4V наблюдали трещины и микропоры при интенсивной вариации импульсов, поэтому данный процесс требует оптимизации [22, 23].

Перспективным направлением является технология ЭЭО керамики – сверхтвердых материалов, содержащих поликристаллические алмазы и кубический нитрид бора [24], и, особенно, неэлектропроводной типа оксидов алюминия, циркония, кремния, карбида бора [25].

Неизбежным результатом действия импульса тока является расплавление не только обрабатываемого материала, но и материала электрода, поэтому к нему предъявляются особые требования, как и к подобным функциональным электротехническим материалам, включающие механическую прочность, электропроводность в интервале температур от комнатной до температуры плавления материала электрода, эрозионную стойкость, электрическую прочность [26]. На качество и производительность ЭЭО большое влияние оказывает материал электрода [27], который выбирается в соответствии со свойствами обрабатываемого материала и требованиями к обработке поверхности. Основными материалами для изготовления электрод-инструмента (ЭИ) являются графит [6, 28], который в настоящее время используют не только для черновой, но и для чистой обработки [25, 29], медь [6, 30-32] и ее сплавы (латунь, дюралюмин) [33, 34], а также композиционные материалы на основе меди с добавлением хрома, молибдена, нитрида бора, карбида вольфрама [6, 35, 36] и системы «вольфрам-серебро» [37]. Электродные материалы на основе меди составляют основную часть применяемых металлических материалов. Наиболее часто используется электролитическая медь М1 и М2, имеющая высокую электро- и теплопроводность. Применение ЭИ из меди МП-15 с пористой структурой (15% пор) позволяет при обработке импульсами прямоугольной формы до 1,5 раз по сравнению с ЭИ из меди М1 повысить скорость съема материала детали, стойкость ЭИ также возрастает. Латунь ЛС-59-1 имеет ограниченное применение при ЭЭО закрытых полостей вследствие ее пониженной до 1,5-3 раз эрозионной стойкости по сравнению с медью [6].

Наиболее предпочтительными для удовлетворения требований к ЭИ являются композиционные материалы типа псевдосплавов. Псевдосплав относится к системе «несмешивающихся компонентов», т. е. к системе, в которой проявляется тенденция к расслоению уже в жидком состоянии и фактически отсутствует растворимость в твердом [38]. Микроструктура контактных псевдосплавов представляет собой тонкую равномерную смесь двух (или более) фаз, из которых одна обладает значительно большей тугоплавкостью, чем другая (например, вольфрам-серебро, хром-медь). При переходе в

такой гетерогенной структуре одной из фаз в жидкое состояние она силами поверхностного натяжения удерживается в порах тугоплавкой фазы, образующей капилляры. При выборе компонентов псевдосплавов должны соблюдаться следующие основные условия: одна из фаз должна иметь высокую электропроводность, так как она несет токовую нагрузку; вторая фаза должна быть механически прочной и значительно более тугоплавкой, чем первая, ее электропроводность играет второстепенную роль; тугоплавкая и легкоплавкая фазы практически не должны взаимодействовать (сплавляться) между собой в интервале рабочих температур; легкоплавкая фаза должна смачивать тугоплавкую фазу [38]. Электроконтактный материал на основе псевдосплавов системы Cu-Cr был разработан еще в 80-е годы и показал ряд преимуществ по сравнению с известными [39-41]. Медь обеспечивает высокую электропроводность материала, а хром в качестве тугоплавкой составляющей обеспечивает необходимую для электроконтактного материала твердость. В настоящее время для ЭИ с высокой стойкостью к выгоранию наибольшее применение находят материалы на основе W, Mo. Типичные соотношения $WCu = 70/30$, $MoCu = 70/30$ или $WAg = 60/40$ [42, 43].

При использовании ЭИ из композиционных материалов существенно повышается экономическая эффективность обработки деталей из твердых, жаропрочных и титановых сплавов, а также из термически обработанных сталей [26, 44, 45]. Лучший из композиционных материалов – МБХ-3 (медь – 3% оксида хрома, 1% бора) обладает повышенной стойкостью и дает возможность увеличить скорость съема материала детали до 2-3 раз. Для ЭЭО деталей из твердых сплавов применяются также ЭИ из композиции МНБ-3 (медь – 3% нитрида бора). ЭИ, выполненные из композиции медь-вольфрам, используются для обработки деталей повышенной точности из твердых сплавов, тугоплавких металлов и сплавов [6]. При увеличении доли тугоплавкой составляющей повышается твердость и эрозионная стойкость электрода, но ухудшается электро- и теплопроводность, поэтому оптимизация состава материала может быть связана с заменой тугоплавкой фазы на твердую и электропроводную, например, карбид кремния [45].

Многие зарубежные фирмы, имеющие в своем составе исследовательские центры, в настоящее время работают в направлении повышения качества обработки и производительности за счет повышения дисперсности графитовых материалов [29]. В качестве новых технологий изготовления ЭИ можно назвать проволоки с покрытием: электроды-проволоки ViperCut A

(медь с покрытием) и ХР (латунная), позволяющие повысить характеристики обработки [46] или с ультракристаллической структурой с поверхностной твердостью порядка 69 HRC без применения никеля, молибдена или вольфрама [47].

Метод порошковой металлургии позволяет варьировать химическое составы, дисперсность и технологические параметры изготовления композиционных материалов для электрода инструмента, включая использование нанодисперсных порошков и механохимическую обработку порошков, позволяющие существенно повысить комплекс свойств материалов [48]. Особенно широкие возможности порошковой металлургии могут быть полезны при разработке новых технологических процессов электроэрозионной обработке, например, обработке неэлектропроводной керамики.

Выводы: анализ литературы показал, что для повышения качества и производительности обработки современных промышленных металлических и керамических материалов в первую очередь необходимо совершенствовать структуру и свойства материалов электродов для электроэрозионного прошивного инструмента, а также оптимизировать режимы обработки и расчета траектории движения инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Каблов, Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7-17.
2. Choi, S.R. Mechanical properties of plasma-sprayed ZrO₂-8 wt% Y₂O₃ thermal barrier coatings / S.R. Choi, Zhu Dongming, R.A. Miller // *NASA/TM-2004*, Рр. 213-216.
3. Антипов, В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 157-167.
4. Каблов, Е.Н. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы / Е.Н. Каблов, Д.В. Граценков, Н.В. Исаева, С.С. Солнцев // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 20-24.
5. Гуняев, Г.М. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами / Г.М. Гуняев, Л.В. Чурсова, О.А. Комарова, А.Г. Гуняева // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 277-286.
6. Елисеев, Ю.С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю.С. Елисеев, Б.П. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
7. Граценков, Д.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов / Д.В. Граценков, Л.В. Чурсова // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 231-242.
8. Антипов, В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы / В.В. Антипов, О.Г. Сенаторова, Н.Ф. Лукина и др. // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 226-230.
9. Анциферов, В.Н. Стоматологическая металлокерамика на каркасе из сплавов титана: Учеб.-метод. Пособие // В.Н. Анциферов, Г.И. Рогожников, С.Е. Порозова и др. – Пермь: Изд-во Перм. гос. мед. академии, 1997. 64 с.
10. Модестов, А. Титан-керамические облицовки // *Зубной техник*. 2003. № 3. С. 50-53.
11. Серебренникий, П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учебное пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. 228 с.
12. Glatte Herausforderun // *Fertigung*. 2011. 39, №8. С. 42-43.
13. Malle, K. Stilsichere Eleganz geschaffen // *Form+Werkzeug*. 2011. №5. С. 38-39.
14. Shulze, V. Abtragregelung der Mikroersion maximiert die Genauigkeit / V. Shulze, C. Ruhs // *Macshinenmarkt*. 2011. №36. Р. 116-119.
15. Блинова, Т.А. Применение устройств для электроэрозионной обработки при прошивании малых отверстий / Т.А. Блинова, С.А. Пономарева // *Международная научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс»*. Ч.1. – М.: Губкин, 2011. С. 84-86.
16. Yannong, Wu. Jingangshi yu moliamoju gongheng (Электроэрозионная обработка) / Wu Yannong, Zhao Jianshe, Tang Lanjian, Liu Chen // *China Mech. Eng.* 2012. 23. № 20, Р. 2430-2433.
17. Халдеев, В.Н. Электроэрозионное формообразование прецизионных оболочек сферической формы: монография / В.Н. Халдеев, А.А. Иванов, Ю.К. Завалишин. – Саров, 2011 (Саранск). 159с.
18. Ханов, А.М. Получение прецизионных титановых зубных коронок электроэрозионным методом / А.М. Ханов, Т.Р. Абляз, Н.Д. Оглезнев // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 4-5. С. 1288-1290.
19. Rudiger, H. Microbohrungen bis 2600 mm Tiefe flott genau erodieren // *Maschinenmarkt*. 2011, № 36. С. 104-106.
20. Verschlaissfreies EndmassTuning // *Form+Werkzeug*. 2012. №3. Р. 34-35.
21. Fertigung im kaum sichtbaren Bereichertigung. // *D+A+CH-Spez*. 2011. 29, №8. Р. S10-S11.
22. Labbaripour, B. Investigating the effect of EDM parameters on surface integrity, MPR and TRW in machining of Ti-6Al-4V / B. Labbaripour, M.H. Sadeghi, Sh. Faridvand, M.R. Shabgard // *Mach. Sci. and Technol.* 2012. 16, № 3. Р. 419-444.
23. Сарилов, М.Б. Исследование технологического процесса медного электрода-инструмента при электроэрозионной обработке титанового сплава ОТ-4 / М.Б. Сарилов, С.В. Борева // *Металлообработка*. 2006. № 5-6. С. 25-28.
24. Jan-lei, Zhang. Zhongguo jixie gongheng (Электроэрозионная обработка) / Zhang Jan-lei, Wng Hua, Yu Chao et al. // *Diamond and abrasives eng.* 2012. 32, № 3. Р. 12-17.
25. Kucuktrurk, G. A new method for machining of electrically nonconductive workpieces using electric discharge machining technique / G. Kucuktrurk, C. Cogun // *Mach. Sci. and Technol.* 2010. 14. №2. Р. 189-207.

26. Бабич, Б.Н. Металлические порошки и порошковые материалы: справочник / Б.Н. Бабич, Е.В. Вершинина, В.А. Глебов и др.; под ред. Ю.В. Левинского. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. 520 с.
27. Матвиенко, Э.В. Влияние материала электрода-инструмента на выбор режимов электроэрозионной обработки / Э.В. Матвиенко, М.А. Варакин, Т.А. Блинова // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс». Ч. 1. – М.: Губкин, 2011. С. 134-137.
28. Automatisch zur Top-Elektrode // Masch. Und Werkzeug. 2012. 113. №3. С. 26-27.
29. Modern Machine Shop. 2006. V. 79. Nr. 3 (август).
30. Glatte Herausforderun // Fertigung. 2011. 39. №8. P. 42-43.
31. Bates, Ch. Влияние материала электрода на производительность электроэрозионного станка // American Machinist. 2004. V. 148. Nr. 2. С. 56-57.
32. Медь или графит – выбор материалов для электродов копировально-прошивочных станков // TraMetal. 2002. Nr. 66. С. 57-58.
33. European Tool and Mould Making. 2007. Vol. 9. Nr. 2 (март).
34. American Machinist, 2007, № 9.
35. Shu, K. Сравнительное исследование электроэрозионного шлифования с использованием электродов из композитов с металлической матрицей // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003. V. 43. Nr. 8 (июнь). P. 845-854.
36. Tsai, H. Свойства и характеристики новых электродов на базе Cr-Cu для электроэрозионных станков / H. Tsai et al. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003. V. 43, Nr 3. P. 245-252.
37. Электроэрозионный копировально-прошивочный станок для прошивки микроотверстий // EDM European (Winter, 2007, международный). С. 8
38. Аврамов, Ю.С. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства / Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. – М.: МГИУ, 1999. 206 с.
39. Li, W.P. Effects of Cr content on the interruption ability of CuCr contact materials / W.P. Li, R.L. Thomas, R.K. Smith // XIX-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2000. V. 2. P. 380-383.
40. Miao, B. Current Status and Developing Trends of Cu-Cr Contact Materials for VCB / B. Miao, Y. Zhang, G. Liu // XX-Ith International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2004. V. 2. P. 311-314.
41. Gentsch, D. Contact Material for Vacuum Interrupters based on CuCr with a Specific High Short Circuit Interruption Ability // XXII-nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2006. V. 2. P. 437-442.
42. Temborius, S. Switching behavior of different contact materials for vacuum interrupters under load switching conditions / S. Temborius, M. Lindmayer, D. Gentsch // XIX-th. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2000. V. 2. P. 519-523.
43. Хоменко, Е.В. Перспективы развития разработок в области материалов для контактов вакуумных выключателей / Е.В. Хоменко, Р.В. Минакова // Электрические контакты и электроды. – Киев: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 1998. 148 с.
44. Федорченко, И.М. Порошковая металлургия: материалы, технология, свойства, области применения: справочник // И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, Н.Д. Радомысльский и др. – Киев: Наукова думка, 1985. 550 с.
45. Косолапова, С.А. Повышение эффективности размерной электроэрозионной обработки пресинструмента на основе применения электродов инструментов, изготовленных из композиционного материала Cu-SiC: автореферат дисс. на соис. уч. степ. канд. техн. наук: 06.02.01. – Красноярск, 1996. 21 с.
46. Запчасти и материалы электроэрозионных станков // F+W 1-11 (февр.). С. 57.
47. Новости технологии // American Machinist. 2007. № 9. С. 12, 14-15.
48. Чернышев, В.Г. Механохимическая обработка медных порошков, предназначенных для изготовления электродов-инструментов: автореферат дис. на соис. уч. степ. канд. техн. наук: 05.16.06. – Владивосток, 2002. 23 с.

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT THE ELECTROEROSIVE PROCESSING

© 2014 N.D. Ogleznev

Perm National Research Polytechnical University

The analysis of a current state of electroerosive processing technology which main problems are need to increase accuracy and process productivity is carried out. Perspectives are connected with electroerosive processing of intermetallic alloys and ceramics, including non-conductive. The directions of development the electroerosive processing at the present stage of development and in perspective also can be realized at application the new composite materials for electrodes tools.

Key words: *electroerosive processing, electrode tool, quality, productivity, composite material*

Nikita Ogleznev, Post-graduate Student.
E-mail: fastrex@mail.ru