

Рисунок 3 – Зависимость диаметра  $D_{\text{опт}}$  смоделированного круга от высоты зуба  $H$  дисковой фрезы модулем  $m = 10$  мм

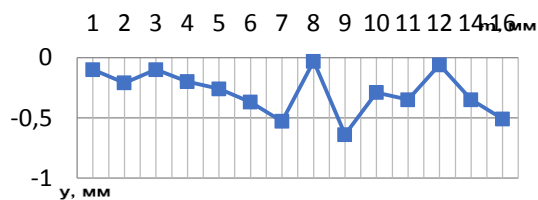


Рисунок 4 – Расстояние  $y$  между вершиной седла и высотой профиля максимально сточенного зуба дисковых фрез модулем  $m = 1 \dots 16$  мм

Формула (1) при выборе шлифовального круга носит приблизительный характер и не позволяют оптимизировать операцию затылования и тем более конструкцию дисковой модульной фрезы. На выбор диаметра круга кроме диаметра фрезы, количества зубьев и заднего угла заточки влияет высота профиля и угол стружечной канавки. Седлообразность возникающая при затыловании фрез смоделированными кругами не влияет на величину предельно сточенного зуба после восстановления, что исключает операцию второго затылования зуба резцом. Выбор оптимального шлифовального круга должен основываться не только на ограничениях, связанных с параметрами станка и применяемой оснастки, но и осуществляться с учетом комплексного показателя операции затылования учитывающего ресурс, как шлифовального круга, так и затачиваемого инструмента.

УДК 621.785

### УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА МОДИФИЦИРОВАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

Алексеев Ю. Г., Будницкий А. С., Сенченко Г. М.

Белорусский национальный технический университет,

e-mail: budnitskiy@park.bntu.by

**Summary.** A new method is proposed for increasing the hardness, wear resistance and antifriction characteristics of the surface of titanium and titanium alloys, based on electrochemical-thermal treatment, which is performed by electrolytic-plasma heating in a nitrogen- or carbon-containing electrolyte, followed by hardening by turning off the operating voltage. When a voltage in the range of 100–300 V is applied to the electrochemical cell, local boiling of the liquid occurs around the workpiece due to the release of Joule heat. Under these conditions, the electrolyte near the surface of the workpiece is heated to the boiling point, and the workpiece being processed, being separated from the bulk of the electrolyte, is heated to temperatures of 400–1100 °C. The high temperatures of the workpiece will make it possible to saturate the surface with atoms of light elements contained in donor substances dissolved in the electrolyte. The presence of carbon-containing and nitrogen-containing components in the electrolyte determines a certain carbon or nitrogen potential of the gas-vapor shell, as a result of which chemical-thermal treatment becomes possible. Under the conditions of electrolytic-plasma heating, diffusion processes are intensified, which makes it possible to significantly reduce the time of chemical-thermal treatment to 5–10 min.

Благодаря особым свойствам титан и сплавы на его основе получили в настоящее время широкое распространение при производстве ряда ответственных изделий. Эти материалы применяются в самолетостроении, атомной энергетике, космической технике, ультразвуковой технике, а также при производстве изделий медицинского назначения. Причем именно производство изделий медицинского назначения является в последнее время одной из важнейших сфер применения титана и его сплавов.

К важнейшим преимуществами титана и титановых сплавов относятся малая плотность, высокая удельная прочность, высокая жаропрочность и чрезвычайно высокая корро-

зионная стойкость, обусловленная способностью титана образовывать на поверхности тонкие сплошные оксидные пленки. При этом имеются недостатки, которые ограничивают, а в некоторых случаях делают невозможным применение титана при изготовлении многих изделий. К ним относятся низкая износостойкость и усталостная прочность, плохие антифрикционные свойства, обусловленные налипанием частиц титана на контртело, в особенности при работе пары трения титан-титан. Поэтому применение изделий из титана и его сплавов в узлах трения и в подвижных соединениях является крайне ограниченным. Обладая незначительной толщиной окисной пленки и большой реакционной способностью участков поверхностей, образующихся в процессе трения, титан склонен к схватыванию с последующим повреждением поверхностей контакта.

Существующие способы повышения твердости, износостойкости и антифрикционных характеристик поверхности изделий авиационной техники, машиностроения и медицины из титана и его сплавов, применяемые в настоящее время в мировой практике, основаны на модифицировании поверхностного слоя с применением ионно-плазменных и химико-термических методов. Применяемые методы позволяют получать на поверхности титана и его сплавов упрочненные слои с микротвердостью до 20 ГПа толщиной до 0,2 мм.

Повышение прочностных и антифрикционных свойств поверхности титана и его сплавов методом химико-термической обработки достигается за счет диффузионного насыщения азотом, бором, кремнием, металлами. Наиболее распространенным видом химико-термической обработки титана и титановых сплавов является азотирование, позволяющее добиться высоких значений микротвердости. Химико-термическое азотирование титана достигается нагреванием его в атмосфере аммиака или азота, соответственно, при 870, 980 °С. Недостатком метода является ухудшение таких механических свойств титана, как прочность, пластичность и вязкость, что связано с образованием на поверхности, наряду с нитридным, также и гидридного слоя. Другим недостатком способа является малая глубина упрочненного слоя – до 0,16 мм. Кроме того, максимальное упрочнение поверхности достигается после очень продолжительной обработки – 16 ч. Ионно-плазменное азотирование обеспечивает диффузионное насыщение поверхностного титана и титановых сплавов азотом в азотной плазме при температуре 800–950 °С. Кроме повышения износостойкости и антифрикционных характеристик, метод обеспечивает повышение коррозионной стойкости поверхности титана. К недостаткам метода необходимо отнести сложность его реализации, необходимость дорогостоящего технологического оборудования и достаточно большую длительность обработки – 3–6 ч.

В качестве альтернативы существующим методам модифицирования поверхности титана и титановых сплавов нами предложен метод электрохимико-термической обработки – электролитно-плазменный нагрев в азот- или углеродсодержащем электролите с последующей закалкой путем отключения рабочего напряжения. При подаче напряжения в диапазоне 100–300 В на электрохимическую ячейку, вокруг заготовки происходит локальное вскипание жидкости за счет выделения джоулева тепла. В этих условиях электролит вблизи поверхности заготовки разогревается до температуры кипения и обрабатываемая заготовка, оказываясь отделенной от основной массы электролита, разогревается до температур 400–1100 °С. Высокие температуры заготовки позволят проводить насыщение поверхности атомами легких элементов, содержащихся в веществах-донорах, растворенных в электролите. Наличие в электролите углеродсодержащих и азотсодержащих компонентов обуславливает определенный углеродный или азотный потенциал парогазовой оболочки, в результате чего становится возможной химико-термическая обработка. В условиях электролитно-плазменного нагрева интенсифицируются диффузионные процессы, что позволит значительно сократить время химико-термической обработки до 5–10 мин.

Преимуществами такого метода перед другими существующими методами термической обработки является высокая скорость нагрева заготовки (до 250 °С/с), а также высокая скорость диффузионного насыщения (до 100 мкм/мин). Кроме того, применение электролит-

но-плазменного нагрева позволяет сформировать на поверхности защитный оксидный слой, обеспечивающий дополнительное повышение коррозионной стойкости.

УДК 621.794.61

## ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Алексеев Ю. Г., Паршутто А. Э., Янович В. А., Сенченко Г. М.

Белорусский национальный технический университет

e-mail: yanovich@park.bntu.by

*Summary. Special requirements are imposed on light-absorbing coatings on products made of aluminum and titanium alloys: ensuring a given spectral reflection coefficient and brightness coefficient; ensuring mechanical strength, hardness and resistance to environmental influences, high adhesion of the coating to the base. In some cases, the coating also requires high resistance to ultraviolet and ionizing radiation, low pressure. The existing methods for obtaining light-absorbing coatings based on chemical methods, anodic oxidation, electrochemical deposition, vacuum plasma treatment, microarc oxidation have a number of disadvantages. The solution to the problem of obtaining high-quality light-absorbing layers with a low reflection coefficient is to improve the characteristics of the technological pulses of the microarc oxidation process and to create fundamentally new processing schemes using electrolyte flows. Therefore, to solve the problem of obtaining high-quality light-absorbing coatings, including on internal surfaces, it is proposed to perform the process of microarc oxidation with controlled anodic and cathodic pulses with a duration of 3–10 ms using a special electrode-hydraulic system.*

Светопоглощающие покрытия применяются в электронно-оптических системах, в приборостроении для снижения рассеянного светового фона, а также при изготовлении приемников излучения, преобразователей солнечной энергии, устройств оптической обработки информации, которые изготавливаются, как правило, из алюминиевых и титановых сплавов. Такие покрытия обеспечивают ослабление фонового излучения. Коэффициент ослабления различается в зависимости от типа и материалов покрытий, химико-физических свойств поверхностей, на которые их наносят.

К светопоглощающим покрытиям предъявляются особые требования: обеспечение заданного спектрального коэффициента отражения и коэффициента яркости; обеспечение механической прочности, твердости и стойкости к воздействию внешней среды в течение срока эксплуатации изделия, высокая адгезия покрытия к основанию. В ряде случаев от покрытия требуется также высокая устойчивость к ультрафиолетовому и ионизирующему излучению, низкому давлению.

Существующие в настоящее время методы получения светопоглощающих покрытий включают химические методы, анодное оксидирование с последующим окрашиванием в анилиновых красителях, электрохимическое осаждение, вакуумно-плазменную обработку, микродуговое оксидирование (МДО). Преимуществом химических методов является возможность обработки поверхностей сложных форм, а также низкая стоимость промышленного оборудования для получения покрытий. Основным недостатком является сложность управления в широких пределах эксплуатационными свойствами покрытий: коэффициентами отражения и яркости, адгезией, износостойкостью. Преимущество вакуумного метода нанесения светопоглощающих покрытий заключается в гибком управлении технологическими параметрами процесса, достижении заданных спектральных значений коэффициента отражения, что весьма затруднительно при использовании химических методов. При этом недостатком является сложность технологии, необходимость контроля большого количества технологических характеристик и высокая стоимость технологического оборудования.

Недостатками применяемых процессов черного никелирования являются как правило низкая коррозионная стойкость, низкая износостойкость формирующихся покрытий, а также