



УДК 620.1.08
ГРНТИ 55.21.99

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПОСЛЕ КОМБИНИРО- ВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

*С.Ю. ЖАЧКИН, доктор технических наук, профессор
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
С.В. ЛАЗАРЕВ, кандидат технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Г.И. ТРИФОНОВ
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье предлагается метод комбинированной плазменной обработки с целью повышения эксплуатационных свойств поверхности авиационных деталей и обеспечения высокого качества поверхности. Также для проверки заявляемого качества покрытия после обработки, предлагается установка по определению коэффициента трения и давления, при котором деталь будет подвержена разрушению.

Ключевые слова: плазменное напыление, лазерная закалка, комбинированная обработка, авиационная промышленность, деталь, поверхность, шероховатость, коэффициент трения, давление.

THE AIRCRAFT ITEMS PHYSICO-MATHEMATICAL PROPERTIES DETERMINATION AFTER COMBINED PLASMA TREATMENT IN AVIATION INDUSTRY

*S.JU. ZHACHKIN, Doctor of Technical Sciences, Professor
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
A.V. LAZAREV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
G.I. TRIFONOV
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

The article offers the combined plasma treatment method with the aim of aircraft items surface properties improving and ensuring the highest surface quality. For the claimed coating quality verification after treatment we suggest the special installation to define the coefficient of friction and pressure at which the item will be exposed to destruction.

Keywords: plasma spraying, laser annealing combined treatment, the aviation industry, item, surface, roughness, the coefficient of friction, pressure.

Введение. На сегодняшний день одна из актуальных и главных задач, стоящих перед авиастроением, является повышение эксплуатационных свойств контактных поверхностей деталей авиационных агрегатов и узлов.

Основопологающим критерием при расчете долговечности работоспособности авиационных деталей является износ поверхностей трения. В результате изнашивания понижается точность перемещения деталей в механизмах, нарушается герметичность конструкции и т.п.



В статье предложен метод комбинированной термической обработки с целью сохранения достигнутой твердости и одновременного обеспечения высокого качества поверхности детали. Также для проверки соблюдения достоверности заявляемого качества покрытия после обработки, предлагается установка по определению коэффициента трения и давления, при котором деталь будет подвержена разрушению.

Методы исследования. Одним из методов возможного пути решения повышения твердости поверхности металла с обеспечением высокого качества является термическое упрочнение, которое производит закалку поверхностного слоя металла как с её оплавлением, так и без оплавления. Закалка без оплавления не позволяет порой достичь заданной глубины, но при этом качество поверхности остается неизменным. Закалка с оплавлением позволяет достичь большей глубины прокаливания, однако это сопровождается образованием на поверхности лунок или бороздок [1].

В случае напыления требуется последующая механическая обработка для устранения дефектов напыления (например, волнистости) а это означает, что часть напыленного слоя в виде припуска удаляется. Однако устранение припуска влечет за собой снижение толщины достаточно малого напыленного слоя, а также приводит к повышению поверхностных напряжений.

Проанализировав различные методы повышения эксплуатационных характеристик поверхностей детали, было выбрано два перспективных направления:

- плазменное напыление композитных материалов;
- финишная лазерная закалка.

Основываясь на том, что одним из главных показателей после изменения свойств поверхности детали является её износ, который зависит от силы трения и других физико-механических факторов, то можно полагать, что уменьшение коэффициента трения будет одним из основных аспектов, подтверждающих необходимость использования предлагаемой обработки.

Для проверки и подтверждения улучшения заявленных характеристик у детали после применения предлагаемой комбинированной плазменной обработки используют специальные установки для определения конкретных физико-механических показателей.

Результаты исследования. Плазменное напыление осуществляется с помощью плазменной струи. Поток плазмы характеризуется следующими показателями: температура в ядре (20 000 – 30 000 К, скорость струи – 300 – 2000 м/с). Схема плазменного напыления представлена на рисунке 1.

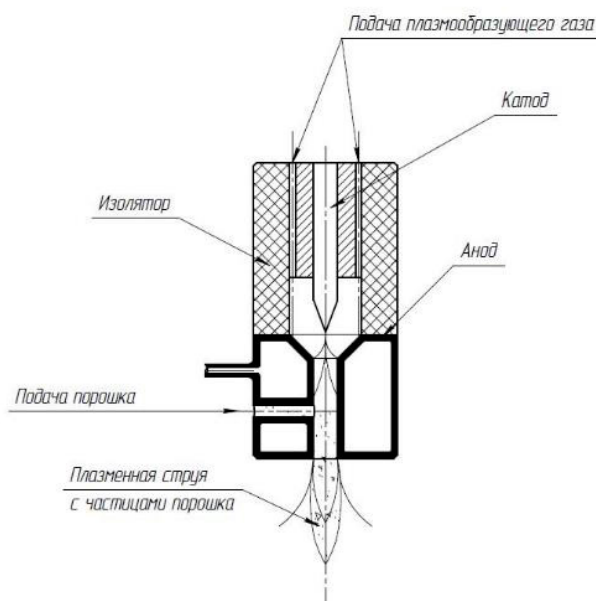


Рисунок 1 – Схема наносимого плазменного покрытия



Наносимый материал в виде порошка вводится в струю плазмы, нагревается и разгоняется в процессе нагрева до скоростей порядка нескольких сотен м/с [2].

При плазменном напылении, напыляемым материалом выступают порошки, проволоки и прутки. В практике плазменного напыления применяют как однородные порошки различных материалов, так и композиционные.

Для выбора материала напыления поверхностей деталей машин, возможно использование следующего подбора материала по функциональному назначению покрытий, приведенного в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Функциональное назначение покрытий

Материал покрытий	Характеристика поверхностного слоя, улучшаемая нанесением покрытий
Al ₂ O ₃ , Al-Ni, Cr-B-Ni-Si, Ni-Ti, Mo, Cr ₂ O ₃ , Cr, WC, MgAl ₂ O ₄	Износостойкость
Al, Al ₂ O ₃ , Cr, Ti, Zn, Cr ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ -TiO ₂	Коррозионная стойкость
Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , Al-Ni, Mo, ZnB, MgAl ₂ O ₄	Термостойкость
ZrO ₂ , WC-CO, TiC, Cr ₂ O ₃ , Cr-B-Ni	Эрозионная стойкость
W, Mo, WC, Cr-Ni, MoSi ₂ , MgAl ₂ O ₄	Жаропрочность
Al-Ni, Ti-Ni, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	Антисхватывание подвижных узлов
Al ₂ O ₃ , NiSi ₂ , Al-Ni, ZrO ₂	Теплоизоляция
Al ₂ O ₃ , BaTiO ₃ , SiO ₂ , MgO- Al ₂ O ₃	Электроизоляция
Mo, Ti-Ni, Al, Ni	Герметичность соединений

В напыленных слоях по мере увеличения толщины покрытия остаточные напряжения, которые при определенной толщине приводят к разрушению напыляемой детали, возрастают. Это происходит, когда остаточные напряжения превышают значение когезионной прочности. После нанесения композитных порошковых материалов на поверхность детали предлагается произвести финишную лазерную закалку обрабатываемой поверхности, что теоретически должно заменить термическую обработку. Это позволит снизить уровень остаточных напряжений до допустимой величины, повысить связь подложки и напыленного слоя и произвести выглаживание поверхности.

Строгое разделение на закалку с оплавлением и без оплавления, ограничивает спектр применения лазерных технологий. Одним из возможных путей усовершенствования метода лазерной закалки является разработка технологии, которая обеспечивала бы глубину закалки близкую к глубине закалки с оплавлением, но при этом не ухудшала бы качество поверхности, а наоборот улучшало [4].

Теоретической основой возможности данного метода является возможность контроля глубины плавления поверхности металла при облучении лазером. Плавление при лазерном облучении рассматривают на основе взглядов на плавление при изотермическом нагревании.

Характерная зависимость представлена на рисунке 2. Необходимо отметить постоянство температуры тела в процессе перехода кристалл – расплав, характерное для всех кристаллов.

При фазовом переходе, протекающем при температуре плавления $T_{пл}$, поглощается скрытая удельная теплота перехода L_m . Данный фактор приводит к необходимости решения нелинейной краевой задачи теплопроводности, задачи Стефана [5].

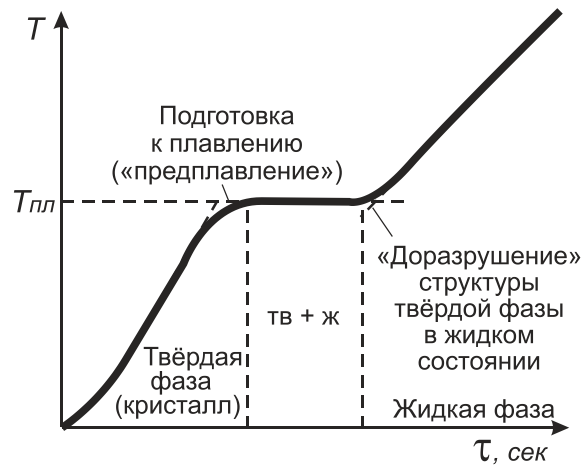


Рисунок 2 – Стабилизация температуры при плавлении кристаллического тела

Поддержание поверхностного слоя при перемещении пучка лазера одновременно в 2-х фазах ТВ+Ж обеспечивает подрезание поверхности на микроуровне, быстрое охлаждение обеспечивает закалку поверхности на расчетную глубину. Отсутствие лунок, возникающих при закалке с оплавлением, объясняется тем, что оплавляются самые высокие точки микрорельефа, а расплавленный металл частично испаряется, а оставшаяся часть заполняет впадины микрорельефа. Сущность метода поясняется рисунке 3.

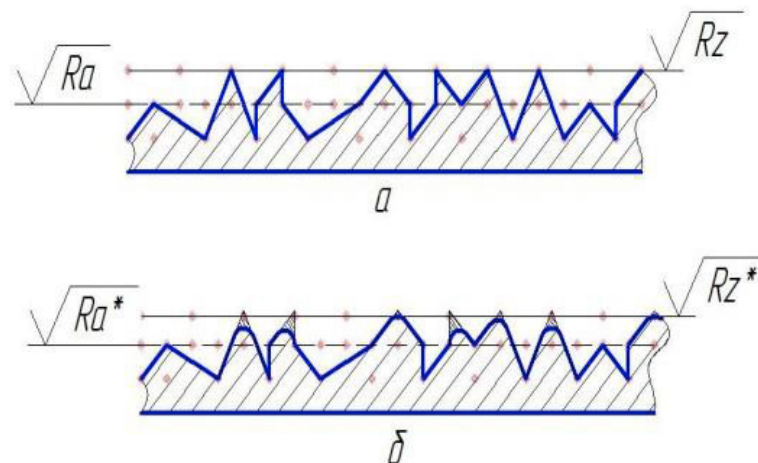


Рисунок 3 – Микрорельеф поверхности, *a* – до обработки, *б* – после обработки

Опираясь на степень изменения коэффициента трения после комбинированной плазменной обработки, мы можем судить о дальнейшем износе детали.

Существуют различные установки и способы по определению физико-механических свойств поверхности детали, которые имеют недостатки. А именно сложность конструкции, что влечет за собой сложности при сборке, ограниченность в формах и размерах испытываемых образцов, дороговизну общей конструкции и т.д.

У предлагаемой установки по определению физико-механических свойств поверхности детали, а именно коэффициента трения и давления, при котором деталь будет подвержена разрушению, данные недостатки отсутствуют.

Схема установки для определения коэффициента трения у испытываемого образца показана на рисунке 4.

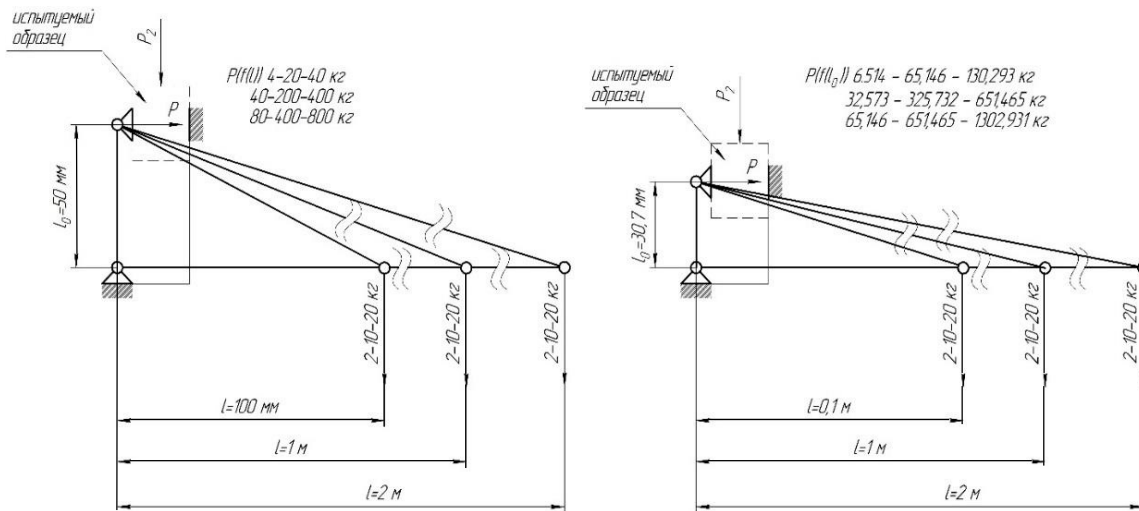


Рисунок 4 – Установка по определению коэффициента трения и удельного давления у детали

Принцип работы заключается в применении простого рычага. На шарнире размещены два рычага длиной l и l_0 , имеющие возможность изменять свою длину. Рычаги закрепляются на шарнирной опоре с возможностью вращения вокруг оси шарнира. Подвесив груз массой m , на плече l мы получим силу, которая создаст крутящий момент на оси шарнира. Разложив момент относительно плеча l_0 получим удельное давление p . Используя жесткую опору и шарнир, размещаем испытуемый образец и нагружаем его удельным давлением p .

Удельное давление определяется:

$$p = \frac{l \times m}{l_0 \times S} \quad (1)$$

где S – площадь давления испытываемого образца.

Приложив к образцу силу P_2 , получим силу трения, следовательно, зная данные величины становится возможным экспериментальное определение коэффициента трения:

$$\mu = \frac{P_2}{p} \quad (2)$$

Изменение давления осуществляется по средствам изменения массы подвешиваемого груза, а также длины плеча l .

Выводы.

1. Плазменное напыление композиционных порошковых материалов обеспечит увеличение долговечности деталей в 2-3 раза, что в десятки раз снизит затраты на ремонт.

2. Финишное лазерное упрочнение даст возможность корректировать различные факторы, влияющих на качество поверхности и глубину закалки.

3. Предлагаемый метод комбинированной плазменной обработки позволит одновременно проводить термическую обработку с выглаживанием поверхности у деталей авиационной промышленности, пример которых представлен в таблице 2.



Таблица 2 – Некоторые примеры использования и внедрения газотермических покрытий

Отрасль	Деталь	Материал покрытия
Ракетно-космическая техника	Детали двигателей, головки и сопла ракет, экраны, аппараты для космических исследований и т.д.	Вольфрам, оксид алюминия, оксид циркония, никелевые сплавы, композиционные материалы и т.д.
Авиационная промышленность	Тормозные колодки, лопатки турбин, обтекатели антенн, стойки шасси, камеры сгорания, приводы рулевых механизмов и т.д.	Оксиды, карбиды, никелевые сплавы, истираемые покрытия и т.д.

С учетом точности измерения исходных величин R_a и R_z , и точность расчетных величин R_a^* и R_z^* , станет возможным обработка прецизионных поверхностей, при условии соблюдения режимов обработки и контроля фактической поверхности.

4. Предложенное устройство по определению физико-механических свойств напыленных поверхностей деталей имеет преимущества перед аналогами, такие как простота сборки, дешевизна, возможность снятия показателей в лабораторной среде любого уровня и возможность работы с образцами любого материала и массы.

5. С экономической стороны вопроса использование комбинированного плазменной обработки в авиационной промышленности приведет к сокращению затрат на изготовление запасных частей, а также к экономии металла, расходуемого на изготовление деталей и увеличению выпуска продукции на существующем оборудовании. Данные преимущества существенно повлияют на совершенствование систем обеспечения полетов, так как значительное сокращение затрат в производстве приведет к перераспределению бюджета на более необходимые статьи расходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнова Н.А. Особенности образования структуры при лазерной обработке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2012. С. 115–129.
2. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления // Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозигов». 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
3. Цырлин М. И. Концепция комплексного моделирования процесса плазменного напыления покрытий на основе порошковых полимерных материалов / Д.А. Родченко // Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике: Труды НТК. Брест: Брестский политехн. ин-т, 1998. С. 73–76.
4. Трифонов Г.И. Некоторые аспекты комбинированных методов обработки стальных деталей / А.В. Бакуменко, Ю.С. Ткаченко // Высокие технологии в машиностроении: материалы Всероссийской научно – технической интернет – конференции. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», 2016. С. 9–11.
5. Данилов В.И. Особенности лазерной резки листовой стали и мониторинг качества образцов после лазерного воздействия / Л.Б. Зуев, А.Н. Малов, А.М. Оришич, В.М. Фомин, В.Б. Шулятьев // Прикладная механика и теоретическая физика, 2006. Т. 47. № 4. С. 176–184.

REFERENCES

1. Smirnova N.A. Osobennosti obrazovaniia struktury pri lazernoi obrabotke // Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie», 2012. S. 115–129.



2. Puzriakov A.F. Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniia // Ucheb. posobie po kursu «Tekhnologii konstruktsii iz metallokompozitov». 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008. 360 s.

3. Tsyrlin M. I. Kontseptsii kompleksnogo modelirovaniia protsessa plazmennogo napyleniia pokrytii na osnove poroshkovykh polimernykh materialov / D.A. Rodchenko // Novye tekhnologii v mashinostroenii i vychislitel'noi tekhnike: Trudy NTK. Brest: Brestskii politekhn. in-t, 1998. S. 73–76.

4. Trifonov G.I. Nekotorye aspekty kombinirovannykh metodov obrabotki stal'nykh detalei / A.V. Bakumenko, Iu.S. Tkachenko // Vysokie tekhnologii v mashino-stroenii: materialy Vserossiiskoi nauchno – tekhnicheskoi internet – konferentsii. Federal'noe gosudarstvennoe biudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obra-zovaniia «Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet», 2016. S. 9–11.

5. Danilov V.I. Osobennosti lazernoi rezki listovoi stali i monitoring kachestva obraztsov posle lazernogo vozdeistviia / L.B. Zuev, A.N. Malov, A.M. Orishich, V.M. Fomin, V.B. Shuliat'ev // Prikladnaia mekhanika i teoreticheskaiia fizika, 2006. T. 47. № 4. S. 176–184.

© Жачкин С.Ю., Лазарев С.В., Трифонов Г.И., 2017

«Воздушно-космические силы. Теория и практика». Материал поступил в редколлегию 10.05.2017 г.

Жачкин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, старший преподаватель кафедры защитных сооружений, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Лазарев Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры эксплуатации и ремонта САТОП, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Трифонов Григорий Игоревич, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского управления научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru