

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Носов Н.В.¹, Мельников П.А.², Хомякова Е.В.¹, Якубович Е.А.¹

¹*Самарский государственный технический университет, Самара, Россия;*

²*Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Самара, Россия*

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, ответственные детали, титановые сплавы, гальваническое покрытие, алмазное выглаживание, упругое выглаживание, режимы обработки, герметичность покрытия, опытно-промышленная проверка.

Аннотация. В статье выполнен анализ особенностей формирования остаточных напряжений в титановых деталях авиационного назначения с хромовым покрытием при алмазном выглаживании. Показано, что предварительное шлифование создает растягивающие остаточные напряжения, которые не устраняются операцией отжига. Для обеспечения герметичности покрытия и адгезии с изделием обосновано применение в качестве финишной обработки упругого алмазного выглаживания с использованием нежесткой оправки, в результате чего в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения. Экспериментально определены и подтверждены параметры режима алмазного выглаживания, обеспечивающие формирование бездефектного хромового покрытия на титановом изделии.

STUDY OF RESIDUAL STRESSES DURING DIAMOND POLISHING OF TITANIUM PARTS WITH CHROME COATING

Nosov N.V.¹, Melnikov P.A.², Homyakova E.V.¹, Yakubovich E.A.¹

¹*Samara state technical university, Samara, Russia;*

²*Samara research center of RAS, Samara, Russia*

Keywords: surface plastic deformation, residual stresses, critical parts, titanium alloys, galvanic coating, diamond polishing, elastic polishing, processing modes, coating tightness, pilot-scale testing.

Abstract. The article analyzes the features of residual stress formation in titanium parts for aviation purposes with chromium coating during diamond polishing. It is shown that preliminary grinding creates tensile residual stresses that are not eliminated by the annealing operation. To ensure the tightness of the coating and adhesion to the product, the use of elastic diamond polishing with a non-rigid mandrel as a finishing treatment is justified, as a result of which compressive residual stresses are formed in the surface layer. The parameters of the diamond polishing mode, ensuring the formation of a defect-free chromium coating on a titanium product, are experimentally determined and confirmed.

Алмазное выглаживание – процесс поверхностного пластического деформирования (ППД), который осуществляется при скольжении индентора с рабочей частью из природного алмаза по контактирующей с ним поверхности детали [1, 2]. Алмазное выглаживание находит широкое применение в производстве ответственных деталей авиационных шасси (гидроцилиндры, поршни, оси, штоки, траверсы) как отделочно-упрочняющая

обработка поверхностным пластическим деформированием, повышающая эксплуатационные свойства деталей и качество поверхностного слоя [3, 4].

Ряд значимых в научном и прикладном плане результатов в указанном направлении представлен в работах [5-8]. Приведены особенности изготовления ответственных деталей авиационных агрегатов, сформулированы основные подходы к определению остаточных напряжений и деформаций после поверхностного пластического деформирования, показано влияние параметров алмазного выравнивания на качество поверхности заготовки.

Вместе с тем, вопросы определения режимов алмазного выравнивания в связи с особенностями формирования остаточных напряжений в изделиях из титана с поверхностным гальваническим покрытием требуют специального рассмотрения.

Для изготовления ряда деталей авиационного назначения используют титановые сплавы ВТ22, ВТЗ-1, обладающие высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью. В производстве обработка титановых сплавов осложнена рядом технологических проблем, среди которых наиболее важными являются технологические остаточные деформации, т.е. изменение размеров и формы деталей вследствие действия остаточных напряжений, а также сложность нанесения износостойких гальванических покрытий из-за плохой адгезии вследствие свойства титана интенсивно окисляться при высоких температурах. Таким образом, технология механической и термической обработки деталей из титановых сплавов требует создания благоприятной технологической наследственности на всех этапах технологического процесса изготовления деталей.

Исследуемая деталь – «поршень со штоком» относится к классу полых цилиндров, соответственно определение величины, характера распределения и глубины залегания максимума сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое образцов осуществлялось при помощи автоматизированной установки для определения остаточных напряжений АСБ-1 (рис. 1), работающей по методу Н.Н. Давиденкова и позволяющей определять остаточные напряжения в плоских и кольцевых образцах, а также в образцах сложной формы.

Проведённые исследования показали, что в процессе предварительной шлифовальной обработки в поверхностном слое формируется распределение растягивающих остаточных напряжений, характеризующееся высокими значениями (до 160 МПа) у поверхности и глубиной залегания до 130-140 мкм, что значительно ухудшает адгезию покрытия к поверхности изделия.

Термическая операция отжига снижает уровень растягивающих напряжений в поверхностном слое до величины 20-40 МПа, но знак напряжений не меняется, они остаются растягивающими. В связи с этим необходимым этапом решения проблемы создания эффективной технологии производства изделий является создание благоприятной технологической наследственности, уменьшении растягивающих и, по возможности, создание

сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей перед нанесением покрытий.



Рис. 1. Автоматизированная установка АСБ-1 для определения остаточных напряжений

Сообразно важной задачей исследований было устранение растягивающих и создание необходимых сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали, обеспечивающих требуемый уровень адгезии и качество гальванического покрытия.

В данном случае после нанесения хромового покрытия в качестве метода финишной обработки поверхности целесообразно применить упругое выглаживание, при котором инструмент с упруго закрепленным алмазным индентором скользит по поверхности детали, создавая пластическую деформацию, упрочняя поверхностный слой и снижая шероховатость [9]. Использование нежесткой конструкции оправки с алмазным индентором (рис. 2) при упругом выглаживании хромового покрытия обеспечивает постоянство силы выглаживания даже при биении детали за счёт снижения жёсткости оправки.

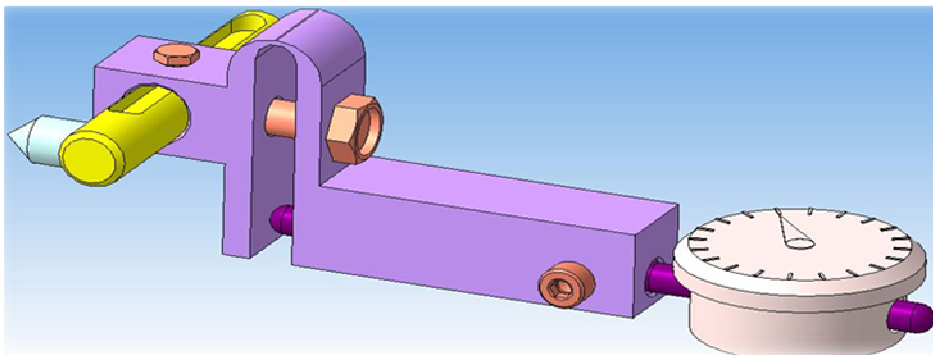


Рис. 2. Нежесткая 3D конструкция оправки

При этом жёсткость оправки должна быть оптимальной, чтобы, с одной стороны, исключить вибрации в результате автоколебаний системы, с другой стороны, жёсткость оправки должна обеспечить постоянство усилия.

Экспериментальные исследования выполнялись на токарно-винторезных станках моделей 1А616 класса точности «П» и 1В616 класса точности «А». На данных станках осуществлялась чистовая токарная обработка образцов и процесс их алмазного выглаживания.

После алмазного выглаживания в поверхностном слое изделия формируются сжимающие остаточные напряжения (рис. 3), максимальное значение которых достигает 220-230 МПа у поверхности и глубина залегания до 110 мкм.

Основным условием обработки алмазным выглаживанием является соблюдение минимального воздействия алмазного выглаживающего наконечника на хромовое покрытие. Этот фактор является наиболее важным, так как интенсивное алмазное выглаживание может привести к повреждению и отслаиванию покрытия. Оптимальность режима обработки определяется по критерию обеспечения герметичности покрытия при минимальном усилии выглаживания.

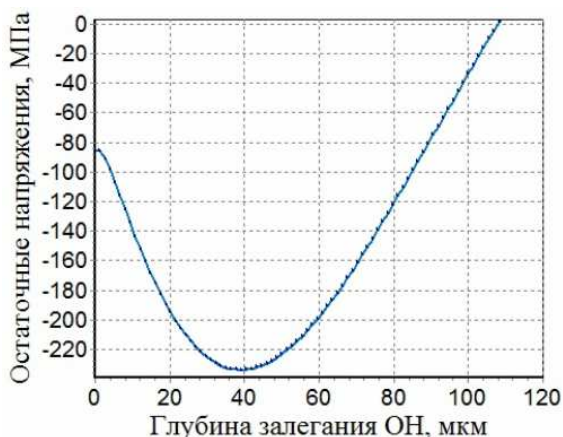


Рис.3. Эпюра остаточных напряжений после алмазного выглаживания

Данный вид обработки применительно к деталям шасси в ряде случаев приводит к повреждению гальванических покрытий. В результате детали подвергаются повторному нанесению покрытий, число которых ограничено технологическим процессом. Перехромирование является особенно трудоёмким и дорогостоящим процессом для крупногабаритных деталей шасси. Поэтому обеспечение герметичности покрытий, исключение вышеуказанных дефектов является важной производственной задачей.

Проверку герметичности хромового покрытия детали «поршень» проводили на стенде на 2-х контрольных участках: 400-450 мм и 10-20 мм от границы хромового покрытия, расположенной в средней части поршня. Давление 150 атм. создаётся азотом в специальной оправке с резиновыми уплотнениями. Потеря герметичности в полости между оправкой и поршнем проявляется в утечках газа через поры в хроме, что свидетельствует о расслаивании и пористой структуре хрома.

На основе результатов реализации экспериментальных программ по оценке эффективности алмазного выглаживания, определены параметры режима, обеспечивающие наилучшее качество поверхности – снижение видимости рисок в окружном и осевом направлениях, отсутствие задиrow хрома и других дефектов: марка алмаза – АСПК; радиус алмаза – 2 мм; обороты шпинделя – 140 об/мин; скорость перемещения суппорта – 18 мкм/об; усилие давления алмаза на поверхность поршня – 200 Н; использовалось индустриальное масло И-20.

Представленные результаты свидетельствуют об эффективности методов алмазного выглаживания для получения бездефектных деталей из титановых сплавов с хромовым покрытием и могут быть использованы при составлении типовых производственных технологических инструкций.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания FMRW-2025-0052.

Список литературы

1. Губанов В.Ф. Выглаживание: качество, технологии и инструменты: Монография. – М.: Изд. дом Академии Естествознания, 2013. – 70 с.
2. Тербило В.М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – с.105.
3. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
4. Суслов А.Г., Гуров Р.В., Ташевских Е.С. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 2. – С. 20-22.
5. Букатый А.С., Букатый С.А., Лёшин Д.П., Округин А.А. Совершенствование конструкции и технологии изготовления ответственных деталей ГТД на основе энергетического метода и исследования жёсткости напряжённого состояния // Сборник материалов IV международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ-2012)». – Рыбинск: Рыбинский государственный авиационный технический университет, 2012. – Ч. 1. – С. 308-312.
6. Букатый С.А. Общий подход к определению остаточных деформаций деталей после упрочнения поверхностным и объёмным пластическим деформированием // Сборник тезисов докладов республиканской научно-технической конференции «Повышение качества деталей машин пластическим деформированием». – Фрунзе, 1988. – С. 88-90.
7. Швецов А.Н., Скуратов Д.Л. Исследование влияния параметров процесса алмазного выглаживания на шероховатость поверхности заготовки из стали 15X12H2МВФАБ-Ш при использовании индентора из натурального алмаза // Вестник СГАУ. – 2014. – №5(47). – Ч. 1. – С. 62-67.
8. Nosov N.V., Kurguzov Y.I., Lyushnya D.I. Investigation of residual stresses during processing of GTE blades with microbeads // Materials Science Forum. 2021, vol. 1037, pp. 547-551.
9. Губанов В.Ф. Модернизированная технология отделочно-упрочняющей обработки // Автоматизация и современные технологии. – 2012. – №2. – С. 10-12.

References

1. Gubanov V.F. Polishing: quality, technologies and tools: Monograph. – M.: Publ. house of the Academy of Natural Sciences, 2013. – 70 p.
2. Terbilo V.M. Diamond polishing. – M.: Mechanical Engineering, 1972. – 105 p.
3. Odintsov L.G. Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation. Handbook. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – 328 p.
4. Suslov A.G., Gurov R.V., Tashevskikh E.S. Finishing and hardening treatment by surface plastic deformation // Hardening technologies and coatings. 2009, no. 2, pp. 20-22.
5. Bukaty A.S., Bukaty S.A., Leshin D.P., Okrugin A.A. Improving the design and manufacturing technology of critical gas turbine engine parts based on the energy method and stress state stiffness research // Collection of materials of the IV international scientific and technical conference "Science-intensive technologies in mechanical engineering and aircraft engine building (TM-2012)". – Rybinsk: Rybinsk State Aviation Technical University, 2012. – Part 1. – P. 308-312.
6. Bukaty S.A. General approach to determining residual deformations of parts after hardening by surface and volumetric plastic deformation // Collection of abstracts of reports of the republican scientific and technical conference "Improving the quality of machine parts by plastic deformation". – Frunze, 1988. – P. 88-90.
7. Shevtsov A.N., Skuratov D.L. Study of the influence of diamond polishing process parameters on the surface roughness of a workpiece made of 15Kh12N2MVFAB-Sh steel using a natural diamond indenter // Bulletin of SSAU. 2014, no. 5(47), part 1, pp. 62-67.
8. Nosov N.V., Kurguzov Y.I., Lyushnya D.I. Investigation of residual stresses during processing of GTE blades with microbeads // Materials Science Forum. 2021, vol. 1037, pp. 547-551.
9. Gubanov V.F. Modernized technology of finishing and strengthening treatment by smoothing // Automation and modern technologies. 2012, no. 2, pp. 10-12.

Носов Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»	Nosov Nikolay Vasilevich – doctor of technical science, professor of Department «Mechanical engineering technology, machinetools and tools»
Мельников Павел Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	Melnikov Pavel Anatolevich – candidate of technical science, senior research fellow
Хомякова Елизавета Вячеславовна – аспирант	Homaykova Elizaveta Vyacheslavovna – postgraduate student
Якубович Ефим Абрамович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» eyakubovich@mail.ru	Yakubovich Efim Abramovich – candidate of technical science, professor of Department «Metal science, powder metallurgy, nanomaterials»

Received 07.07.2025