

## Библиографический список

1. Фридман, Я.Б. Единая теория прочности материалов / Я.Б. Фридман. – М.: Оборонгиз, 1943.
2. Фридман, Я.Б. Деформация и разрушение металлов при статических и динамических нагрузках / Я.Б. Фридман. – М.: Оборонгиз, 1946. – 227 с.
3. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов. Изд.3-е, перераб.и доп. В двух частях. Часть первая. Деформация и разрушение / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
4. Букатый, А.С. Методология оптимизации конструкции и технологии поверхностного упрочнения авиационных деталей на основе критерия жёсткости напряжённно-деформированного состояния: автореф. ... докт. техн. наук: 01.02.06 / А.С. Букатый. – Самара, 2019. – 35 с.
5. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчёта операций пластической обработки материалов. 2-е изд., переработ. и доп. / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машгиз, 1961. – 463 с.
6. Смирнов-Аляев, Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
7. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчёты процессов конечного формоизменения материалов. Изд. 3-е, переработ. и доп. / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
8. Петерсон, Р. Е. Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчёта конструктивных элементов на прочность / Р. Е. Петерсон // Пер. с англ. И. А. Нечая, И. П. Сухарева, Б. Н. Ушакова. – М.: МИР, 1977. – 302 с.

УДК 621.787:539.319

**Букатый А.С., Зотов Е.В., Мухин А.Ю., Фёдоров Д.Г., Гуськов Д.М.**

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЙ ПОВЫШЕННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Адгезия, износостойкость покрытий, получаемых плазменным и газопламенным напылением, а также гальваническими методами являются основополагающими показателями в производстве деталей шасси. Ключевым фактором, влияющим на адгезию покрытий, являются остаточные напряжения [1], которые создаются в поверхностном слое детали на подготовительных этапах технологического процесса. В производстве деталей шасси основной операцией, формирующей технологическую наследственность перед нанесением покрытий, является операция «Шлифова-

ние». Как правило, шлифовальная обработка приводит к созданию растягивающих остаточных напряжений и прижогов, отрицательно влияющих как на сопротивление детали усталости, так и на адгезию покрытий. Прижоги, в том числе скрытые, создаваемые в материале поверхностного слоя поршней и гидроцилиндров, являются причиной отслаивания покрытий. Эта проблема особенно актуальна для деталей из титановых сплавов. Например, при производстве деталей из материала ВТЗ-1 наличие высокого уровня растягивающих остаточных напряжений приводит к отслаиванию покрытий для ~95% выпущенных деталей. Для деталей из материала ВТ22 отслаивание вследствие прижогов составляет ~60%. В ряде случаев наблюдается отслаивание покрытий на этапе испытаний гидроцилиндров, вызванное наличием растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей.

Решение указанных проблем заключается в создании благоприятной технологической наследственности после операции «Шлифование». Снижение уровня растягивающих и создание сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей позволяет обеспечить требуемую адгезию покрытий [2], при этом улучшаются параметры герметичности и механические свойства создаваемого покрытия [3].

В данной работе описаны результаты опытно-технологических работ, проведённых с целью оптимизации режимов шлифования по остаточным напряжениям для обеспечения адгезии покрытий, получаемых гальваническими методами, а также плазменным и газопламенным напылением. Исследования проводились на деталях «Поршень со штоком», представляющих собой основной тип деталей, изготавливаемых при производстве авиационных шасси (рис. 1). На АО «Авиаагрегат» детали «Поршень со штоком» изготавливаются из титановых сплавов ВТЗ-1 и ВТ22, имеющих высокие показатели удельной прочности и коррозионной стойкости. При производстве деталей по базовому технологическому процессу основными дефектами являлись сколы и отслаивания покрытия. Для материала ВТЗ-1 процент брака достигал ~95%. Мероприятия по замене материала ВТЗ-1 на ВТ22 снизили процент брака, но не позволили полностью решить проблему.

Наиболее эффективным мероприятием являлось применение упрочняющей пневмодробеструйной обработки после операции «Шлифование». Упрочнение штоков перед нанесением покрытий позволило оперативно решить проблему отслаивания, однако не допускалось требованиями конструкторской документации и технологического процесса. Вследствие этих требований было принято решение обеспечить адгезию хромового покрытия с помощью оптимизации режимов шлифования. Основными задачами работ являлось полное исключение скрытых прижогов и минимизация растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей.

На начальном этапе работ проводилось определение остаточных напряжений [4], создаваемых в поверхностном слое детали «Поршень со штоком» при шлифовании на режимах, указанных в базовом технологическом процессе. Эпюра остаточных напряжений после шлифовальной обработки детали «Поршень со штоком» показана на рис. 2. Определение остаточных напряжений на всех этапах работ проводилось на установке АСБ-1 [5] (рис. 3). Вырезка образцов в форме полуколец осуществлялась электроэрозионной обработкой. Фотографии образцов представлены на рис. 4.



Рис. 1. Отслаивание покрытия на детали «Поршень со штоком» из материала ВТЗ-1

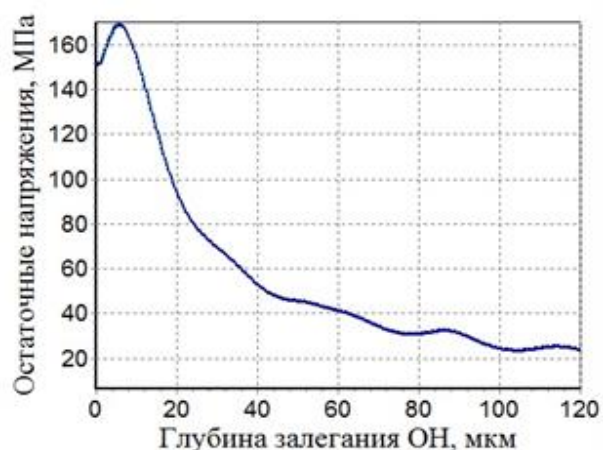


Рис. 2. Эпюра остаточных напряжений после шлифовальной обработки детали «Поршень со штоком»



Рис. 3. Установка для автоматического определения остаточных напряжений АСБ-1



Рис. 4. Образцы-полукольца

Напряжения после операции «Шлифование» являлись растягивающими и достигали величины 170 МПа. Операция «Отжиг», следующая за операцией «Шлифование», уменьшала уровень растягивающих ОН, но не обеспечивала требуемую адгезию.

С целью выявления оптимального режима шлифования на следующем этапе опытных работ был разработан план проведения полнофакторного эксперимента. Основными варьируемыми факторами, влияющими на остаточные напряжения, были: скорость продольного перемещения стола (5,3; 15 мм/об), шаг поперечного перемещения шлифовального круга – припуск на обработку (0,005; 0,01; 0,02 мм), скорость вращения образца (50, 100, 200, 300, 400 об/мин). Общий припуск, снимаемый за операцию «Шлифование», был одинаков для всех образцов и составлял 0,1 мм (0,2 мм в диаметре). Для проведения опытно-технологических работ были выбраны 30 режимов круглого шлифования наружной поверхности образцов из материала ВТЗ-1. Определение остаточных напряжений проводилось для всех выбранных режимов.

По результатам проведённых работ был найден режим, позволивший снизить подслоинные растягивающие остаточные напряжения до величины  $\sim 20$  МПа на глубине залегания  $\sim 10$  мкм, при этом на поверхности были получены околонулевые напряжения, составляющие  $\sim -3$  МПа.

Представленные результаты получены на следующем режиме:

- продольное перемещение стола: 5,3 мм/об. детали;
- поперечное перемещение круга (припуск на обработку): 0,02 мм;
- скорость вращения образца: 300 об/мин;
- количество проходов: 20.

Полученный режим круглого шлифования исключил появление прижогов и обеспечил требуемую адгезию хромового покрытия детали «Поршень со штоком» из материала ВТЗ-1. Для проверки адгезии хромовое покрытие было прошлифовано до материала детали (рис. 5 и 6). Отслоение покрытия не наблюдалось на всех исследуемых деталях.



Рис. 5. Проверка адгезии покрытия на детали «Поршень со штоком»

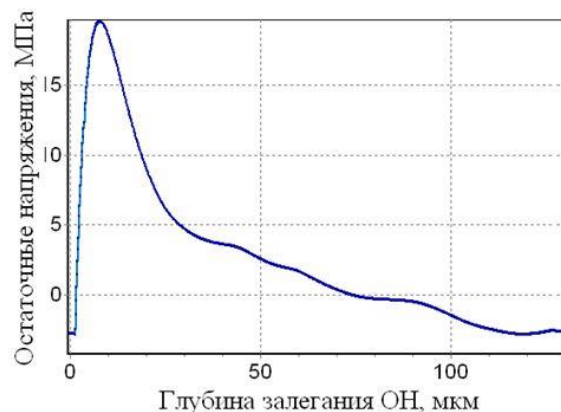


Рис. 6. Эпюра остаточных напряжений после шлифования на выбранном режиме

На заключительном этапе работ полученный режим был апробирован на деталях – штоках, цилиндрах, поршнях, изготавливаемых из титановых сплавов ВТ 22, ВТ 3-1 и сталей 30ХГСА, 30ХГСН2А.

Результаты работ позволили обеспечить требуемый уровень адгезии для покрытий, получаемых гальваническим способом (хромирование, никелирование), а также покрытий, получаемых плазменным и газопламенным способом.

### **Библиографический список**

1. Букатый, А.С. Повышение адгезии гальванических покрытий на основе исследования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из титановых сплавов / А.С. Букатый, А.А. Декань, В.В. Лунин, Е.В. Зотов // I Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления интеграции науки, образования и производства». – Керчь: КГМТУ, 2020. – С. 107-110.

2. Букатый, А.С. Обеспечение адгезии гальванических покрытий для титановых сплавов на основе исследования остаточных напряжений после шлифования и упрочнения / А.С. Букатый, В.В. Лунин, П.А. Пешков, Е.В. Зотов // XXI Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: Самарский Университет, 2020. – Ч. 2. – С. 69-72.

3. Букатый, А.С. Оптимизация технологического процесса изготовления деталей из титановых сплавов для обеспечения адгезии покрытий из никеля и хрома / А.С. Букатый, В.В. Лунин, П.А. Пешков, Е.В. Зотов // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – Самара: Самарский Университет, 2018. – С. 231-233.

4. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.

5. Букатый, С.А. Автоматизированная система определения остаточных напряжений / С.А. Букатый, А.С. Букатый // Механика и процессы управления. Труды XXXVIII Уральского семинара. – Екатеринбург: УрО РАН, Миасс, 2008. – Т. 1. – С. 191-194.

УДК 539.4.014.13

**Букатый А.С., Сараев А.С., Лунин В.В., Солтанов С.А., Гаврилов Д.О.**

### **ПОВЫШЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ГИДРОЦИЛИНДРОВ МЕТОДОМ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ**

В производстве деталей шасси алмазное выглаживание штоков и гидроцилиндров находит широкое применение в качестве отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Преимуществом данного способа обработки, по сравнению с дробеструйной и многими другими способами упрочнения методами ППД, является высокая степень чистоты по-