

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЙ ИЗ НИКЕЛЯ И ХРОМА НА ДЕТАЛЯХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2018

А. С. Букатый кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
bukaty@inbox.ru

Проведены работы по обеспечению адгезии хромового покрытия на деталях «поршень со штоком» из титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ22 на основе исследования остаточных напряжений. Обеспечение адгезии покрытий проводилось в два этапа: на первом этапе была применена упрочняющая обработка, на втором этапе проведена оптимизация режимов шлифования по остаточным напряжениям. Приведена методика прогнозирования технологических остаточных деформаций деталей по эквивалентным начальным напряжениям. Исследованы остаточные напряжения в поверхностном слое образцов, вырезанных из упрочняемых деталей. Установлено, что сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое обеспечивают адгезию покрытий при хромировании деталей из титановых сплавов. Показано, что обеспечение адгезии покрытий на деталях из титановых сплавов может быть получено как с применением упрочняющей обработки, так и без упрочнения – путём оптимизации режимов шлифования. Результаты работ позволили исключить прижоги при шлифовании деталей из титановых сплавов, обеспечить благоприятную технологическую наследственность не только для исследуемых деталей, но и для других деталей – поршней, гидроцилиндров, штоков.

Упрочняющая обработка; шлифование; адгезия покрытий; хромирование; никелирование; остаточные напряжения.

Цитирование: Букатый А.С. Оптимизация технологических процессов по остаточным напряжениям с целью обеспечения адгезии покрытий из никеля и хрома на деталях из титановых сплавов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 3. С. 138-147.
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-138-147

Введение

Титановые сплавы находят широкое применение в авиационной промышленности благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. В производстве особо ответственных деталей авиационных шасси, таких как поршни, штоки, оси, траверсы применяются материалы ВТ22, ВТЗ-1. Обработка титановых сплавов осложнена рядом технологических проблем, среди которых наиболее важными являются технологические остаточные деформации (ТОД) – изменение размеров и формы деталей вследствие действия остаточных напряжений (ОН), а также нанесение 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 связана с созданием благоприятной технологической наследственности на всех этапах технологического процесса, что является важной задачей при изготовлении деталей авиационных шасси.

В производстве АО «Авиаагрегат» (г. Самара) штоки и поршни гидроцилиндров являются высокотехнологичными деталями, к которым предъявляются повышенные требования по точности изготовления, износостойкости и герметичности гальванических покрытий. При этом актуальной задачей является повышение адгезии покрытий из никеля и хрома при гальванической обработке деталей из сплавов ВТ22 и ВТЗ-1.

В данной работе изложены результаты исследований проблемы – отслаивания покрытия при хромировании штоков (рис. 1), изготавливаемых из ВТ22 и ВТ3-1. Технологический процесс производства штоков включает операции, ключевыми среди которых являются «Шлифование» и «Отжиг». Проведённые исследования показали, что в процессе шлифовальной обработки в поверхностном слое детали создаются растягивающие остаточные напряжения (рис. 2), значительно ухудшающие адгезию покрытий. При этом наиболее неблагоприятным является создание растягивающих остаточных напряжений при шлифовании в результате «прижогов». Операция «Отжиг» снижает уровень растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое до величины 20...40 МПа, но знак напряжений не меняется и остаточные напряжения остаются растягивающими. В связи с этим решение проблемы заключается в создании благоприятной технологической наследственности, уменьшении растягивающих и, по возможности, создании сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей перед нанесением покрытий.



Рис. 1. Шток из материала ВТ3-1 с дефектами хромового покрытия



Рис. 2. Эюра остаточных напряжений после шлифовальной обработки штоков

Применение упрочняющей дробеструйной обработки

Одним из наиболее распространённых способов создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей на авиационных производствах является упрочнение методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Дробеструйная обработка микрошариками применяется в основном на заключительных этапах технологического процесса с целью повышения сопротивления усталости всех изготавливаемых в авиации ответственных деталей. Исследования проводились на детали «поршень со штоком» из материала ВТ3-1, обладающего значительно худшей адгезией по сравнению с ВТ22. При изготовлении по базовому технологическому процессу (серийной технологии) наблюдалось отслаивание хромового покрытия на всех изготовленных деталях. Для повышения адгезии хромового покрытия детали «поршень со штоком» на основе работ [1; 2] разработаны мероприятия, целью которых является назначение режимов дробеструйной обработки, создающих в поверхностном слое детали сжимающие остаточные напряжения. При этом наряду с улучшением адгезии покрытий одним из основных требований являлось обеспечение ТОД штока в заданных технологических допусках. Использование для опытно-технологических работ натуральных деталей экономически нецелесообразно, поэтому при назначении режимов дробе-

струйной обработки необходимо прогнозирование остаточных деформаций, возникающих в процессе упрочнения.

Для прогнозирования ТОД упрочняемых деталей аналитическими методами требуется интегральная величина начальных напряжений (НН) по толщине слоя a , определение которой не представляет трудностей. Однако в расчётах методом конечных элементов необходимо НН задавать на малой толщине a послойно, что с последующим расчётом является трудоёмкой задачей. Расчёт ТОД значительно упрощается, если НН задавать в виде некоторой эквивалентной и постоянной по толщине слоя величиной σ_z .

В процессе упрочняющей обработки в поверхностном слое детали образуются необратимые изменения линейных размеров – первоначальные деформации (ПД) [3], в результате чего состояние детали становится неуравновешенным. В силу отсутствия достаточно точных методов определения ПД в качестве эквивалента воздействия ПД на деталь в работе [4] предложено использовать начальные напряжения. Под действием НН деталь упруго деформируется и приходит в равновесное состояние. При этом в результате упругого деформирования в поверхностном слое происходит перераспределение – разгрузка НН, а в остальном объёме детали возникают упругие напряжения. Новое равновесное напряжённое состояние (НС) детали называется остаточным, а образовавшиеся остаточные напряжения в работе [5] предложено разделить на «активные» ОН – перераспределившиеся в поверхностном слое НН, и «реактивные» ОН – в остальном объёме детали. Из условия равновесия следует, что действие активных ОН следует применять к детали без поверхностного слоя. В этом случае потребуется перерасчёт всех геометрических характеристик детали. В практических расчётах это неудобно. Поэтому, как показано в работах [4; 5], для расчёта ТОД применительно ко всему объёму детали можно использовать НН. В развитие данного подхода предложено использовать удельную энергию НН u_0 в качестве меры воздействия НН на деталь. Такой подход становится особенно удобным и эффективным при расчёте ТОД методом КЭ с применением пакетов ANSYS, КОСМОС и др.

В настоящее время известны два способа определения НН на основе ОН: путём численного решения интегрального уравнения [4] и методом последовательных приближений [5; 6]. На наш взгляд, предпочтительнее метод последовательных приближений, позволяющий использовать ОН, получаемые по экспериментальным образцам или образцам, вырезанным из деталей. Обычно ОН определяют методом послойного сравнения поверхностного слоя на образцах прямоугольной формы (рис. 3). Толщину образцов h выбирают близкой к толщине упрочняемых деталей h_d , если величина $a/h_d \leq 0,1$, но не менее 2,5 – 3мм.

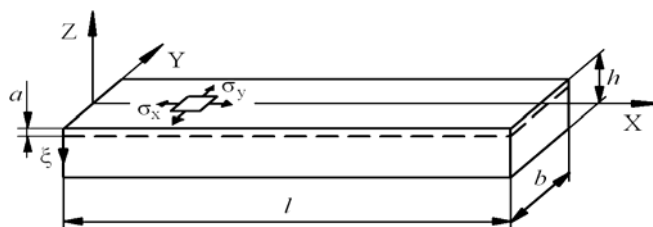


Рис. 3. Ориентация системы координат и направления остаточных напряжений

Принято считать, что дробеударные способы упрочнения создают в направлениях X и Y одинаковое пластическое деформирование поверхностного слоя и, следовательно, $\sigma_x = \sigma_y$. Поскольку метод удаления поверхностных слоёв позволяет определять только совокупность ОН $\sigma_{ocm} = (\sigma_x - \mu\sigma_y)$, то можно принять

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\sigma_{ocm}}{1 - \mu}, \quad \sigma_z = \sigma_\xi = 0, \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона материала.

В общем случае выражение для удельной энергии деформированного поверхностного слоя имеет вид:

$$u_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные начальные напряжения; E – модуль упругости материала.

Поскольку при ППД возникают сжимающие ОН и НН, то в рамках условия (2) можно принять

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\sigma_n}{1 - \mu}, \quad (3)$$

и на основании (3) получаем

$$u_0 = \frac{\sigma_n^2}{(1 - \mu)E}. \quad (4)$$

В тех случаях, когда $\sigma_x \neq \sigma_y$ и упрочняемая поверхность детали обладает существенной кривизной, следует анализировать соответствующее начальное напряжённое состояние в слое толщиной a и определять главные напряжения. При этом в большинстве практических случаев напряжениями σ_ξ можно пренебречь, т.к. их величина имеет порядок $\sigma_{ocm} a/R$, где R – радиус кривизны поверхности.

Для обоснования выбора критерия введём понятие удельной поверхностной энергии слоя толщиной a :

$$U_0 = \int_0^a u_0 d\xi = \frac{1}{(1 - \mu)E} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi. \quad (5)$$

Тогда параметры режимов упрочнения будем связывать с величиной и глубиной залегания НН через U_0 , от которой зависят ТОД. В этом случае становится возможным пренебречь характером распределения НН по толщине слоя a . Это существенно упрощает расчёты ТОД, т.к. фактическое распределение НН можно заменить некоторыми постоянными по толщине слоя a эквивалентными напряжениями $\sigma_n = \text{const}$, величину которых найдём из соотношений

$$U_0 = \frac{1}{(1-\mu)E} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi = \frac{1}{(1-\mu)E} \int_0^a \sigma_s^2 d\xi = \frac{\sigma_s^2 a}{(1-\mu)E}. \quad (6)$$

Отсюда получаем формулу для эквивалентных НН при одноосном напряжённом состоянии:

$$\sigma_{s1} = \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi}. \quad (7)$$

Выражение (7) удобно для расчёта ТОД стержневых и кольцевых деталей с недеформируемым поперечным сечением. В общем случае для деталей сложной формы требуются обе составляющие эквивалентных напряжений. На основании (3) и (5) выразим удельную и удельную поверхностную энергию через эквивалентные напряжения:

$$u_{0s} = \frac{1}{2E} [\sigma_s^2 + \sigma_n^2 - 2\mu\sigma_s\sigma_n] = \frac{1-\mu}{E} \sigma_s^2, \quad (8)$$

$$U_{0s} = \int_0^a u_{0s} d\xi = \frac{1-\mu}{E} \int_0^a \sigma_s^2 d\xi = \frac{1-\mu}{E} \sigma_s^2 a. \quad (9)$$

Приравняв выражения (5) и (9), получим σ_{s2} для плоского НДС:

$$\sigma_{s2} = \frac{1}{1-\mu} \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi}. \quad (10)$$

Таким образом, величина U_0 может служить универсальным критерием для связи режимов упрочнения с ТОД. Особенно удобным становится применение U_0 в задачах, где равномерная обработка упрочнением по всей поверхности детали вызывает недопустимые ТОД. В этом случае на эффективном режиме обрабатывают наиболее ответственные и опасные участки поверхности (например, наиболее нагруженные участки или зоны концентрации напряжений). В зависимости от возникающих при этом ТОД остальная поверхность, подлежащая упрочняющей обработке, обрабатывается на пониженном или повышенном (для исправления геометрии) относительно основного режиме. Упрочняемые зоны определяют на основе предварительного расчётного анализа ТОД. Необходимо отметить, что принятое условие эквивалентности реальной и осреднённой эпюр распределения напряжений по толщине поверхностного слоя осуществляется не с целью исследования остаточного напряжённого состояния упрочнённого поверхностного слоя, а с целью упрощения процесса моделирования деформаций, вызванных напряжениями, и уменьшения времени расчёта, т.е. оно наиболее эффективно при анализе ТОД деталей сложной геометрической формы.

Опытные работы проводились на упрочняющей пневмодробеструйной установке на базе робота АВВ. Поскольку целью данной работы является не повышение долговечности, а улучшение адгезии покрытия, основной задачей исследований было устранение растягивающих и создание необходимых сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали, подвергаемой гальваническому покрытию.

После проведения предварительной оценки ТОД в качестве режима обработки был выбран наименее интенсивный режим упрочнения, обеспечивающий наилучшую шероховатость упрочняемой поверхности и достаточный уровень сжимающих остаточных напряжений, не приводящий к значительным ТОД упрочняемых деталей. Для обработки режимов упрочнения использовались контрольные пластины длиной 100 мм. Получено оптимальное время насыщения поверхностного слоя детали ударами микродроби, составившее 5,3 с при скорости перемещения сопла 19 мм/с. По результатам упрочнения контрольных пластин и построения кривой насыщения их прогибов установлены параметры режима упрочняющей обработки: скорость перемещения сопла 19 мм/с; давление воздуха 1,8 ат; расход дроби 4,5 кг/мин (для одного сопла); количество сопел 2 шт.; диаметр дроби (стальные микрошарики) 0,6 мм; расстояние от сопел до упрочняемой поверхности 175 мм.

Поскольку деталь – «поршень со штоком» относится к классу полых цилиндров, определение остаточных напряжений осуществлялось на образцах – полукольцах с применением автоматизированного прибора АСБ-1 [7]. При этом учитывалось изменение деформаций колец от разрезки. Эпюра остаточных напряжений после упрочняющей обработки показана на рис. 4.

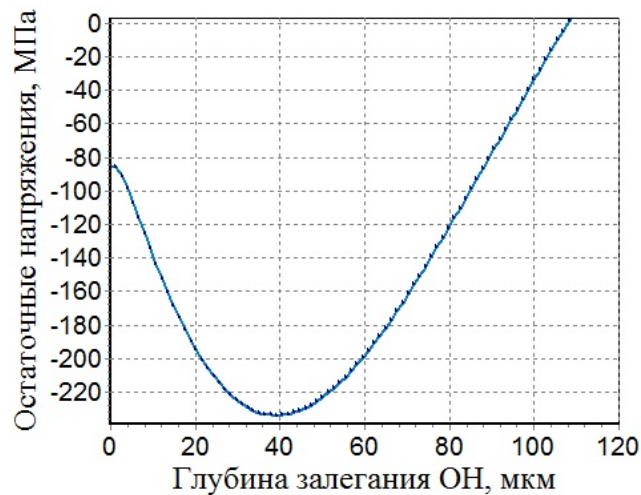


Рис. 4. Эпюра остаточных напряжений после упрочняющей обработки микрошариками

Деталь №1 (рис. 5) изготавливалась по базовому технологическому процессу, то есть не подвергалась упрочнению. Деталь №2 (рис. 6) подвергалась упрочнению на установленном режиме. После операции «Хромирование» обе детали подвергались шлифованию в соответствии с базовым технологическим процессом. Шлифование детали №1 привело к сколам покрытия (рис. 5) сразу после начала процесса шлифования. В процессе шлифования детали №2 получено требуемое хромовое покрытие без дефектов. Для проверки адгезии покрытие было прошлифовано до материала детали, в результате чего сколы хрома не выявлены. На рис. 5 показано прошлифованное насквозь хромовое покрытие с проявлением мелких участков основного материала. Таким образом, применение наименее интенсивных режимов упрочняющей обработки позволило обеспечить не только качественное нанесение покрытий, но и геометрические размеры и форму изготовленной детали в соответствии с требованиями технологического процесса.



Рис. 5. Сколы хромового покрытия



Рис. 6. Шток без сколов покрытия

Оптимизации режимов шлифования по остаточным напряжениям

Результаты, полученные на первом этапе с применением упрочняющей обработки, являются решением проблемы обеспечения адгезии гальванических покрытий на деталях из титановых сплавов. Однако в большом количестве случаев применение упрочняющей обработки не предусмотрено технологическим процессом и внедрение упрочнения не представляется возможным ввиду тонкостенности детали или по иным причинам.

Предварительные эксперименты на натуральных деталях показали, что правильный выбор режимов шлифования может обеспечить на поверхности детали сжимающие остаточные напряжения или значительно уменьшить растягивающие. Таким образом, была поставлена задача добиться адгезии покрытий без изменения базового технологического процесса, не предусматривающего применение упрочняющей обработки.

Опытные работы проводились на образцах – кольцах (рис. 7), вырезанных из деталей – штоков из материала ВТЗ-1. Разрезка деталей на образцы осуществлялась электроэрозионным способом. Образцы закреплялись в специальную оправку и подвергались шлифованию на различных режимах. Основными варьируемыми факторами, влияющими на параметр оптимизации – остаточные напряжения – были выбраны: 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 суммарно за операцию «Шлифование» одинаков для всех образцов и составляет 0,1 мм (0,2 мм в диаметре). Факторы варьировались в указанных диапазонах, в результате чего исследованиям подвергалось 30 режимов шлифования. Эпюра остаточных напряжений, полученная при определении напряжений в образцах, обработанных на исходных режимах по базовому технологическому процессу, показана на рис. 2. По результатам проведённых работ выбран режим шлифования: скорость перемещения стола – 5,3 мм/об, шаг поперечного перемещения шлифовального круга – припуска на обработку – 0,01 мм, скорость вращения образца – 300 об/мин. Выбранный режим обработки обеспечил сжимающие остаточные напряжения на поверхности 8 МПа и снижение растягивающих напряжений со 170 до 20 МПа. Максимум растягивающих напряжений при этом находится на глубине 8 мкм. Эпюра остаточных напряжений

приведена на рис. 8. Полученный режим шлифования исключил появление прижогов и обеспечил адгезию хромового покрытия при гальванической обработке детали «поршень со штоком» из материала ВТ3-1.

Результаты работ апробированы на деталях – штоках, цилиндрах, поршнях. Улучшение адгезии получено не только для хромового покрытия, но и для покрытия никелем.

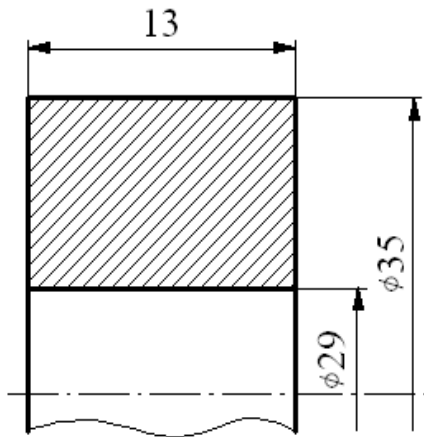


Рис. 7. Кольцевой образец

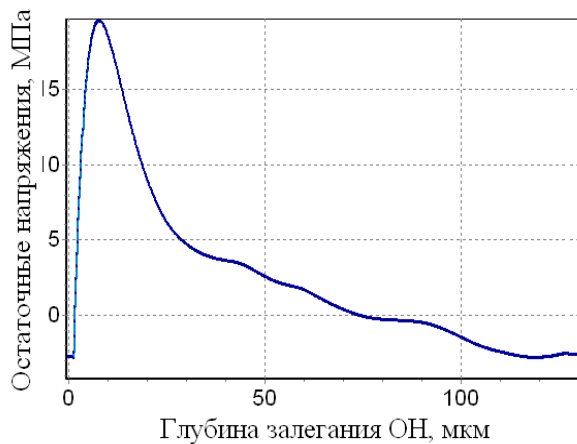


Рис. 8. Эпюра остаточных напряжений

Заключение

На основе исследования остаточных напряжений проведена оптимизация технологических процессов упрочняющей и шлифовальной обработки для детали «поршень со штоком» с целью минимизации растягивающих и создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое.

Полученные результаты опытно-технологических работ, проведённых по результатам исследований, позволили обеспечить адгезию гальванических покрытий для деталей из титановых сплавов ВТ22 и ВТ 3-1.

Разработан метод, позволяющий прогнозировать технологические остаточные деформации деталей после упрочнения методами поверхностного пластического деформирования на основе моделирования эквивалентных начальных напряжений.

Определены режимы шлифования, которые позволили исключить прижоги и обеспечить наличие сжимающих остаточных напряжений, улучшающих адгезию гальванических покрытий. При этом величина подслояных растягивающих остаточных напряжений снижена со 170 до 20 МПа.

Библиографический список

1. 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 // Сб. материалов IV международной научно-технической конференции «Наукоёмкие

технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ-2012)». Ч. 1. Рыбинск: Рыбинский государственный авиационный технический университет, 2012. С. 308-312.

2. Букатый С.А., Семенченко И.В. Коробление и размерная стабильность маложёстких тонкостенных деталей в производстве газотурбинных двигателей // Вестник машиностроения. 1994. № 10. С. 32-37.

3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. 232 с.

4. Овсёнок А.Н. Технологические основы методов снижения остаточных деформаций и обеспечения качества обработки высоконагруженных деталей энергомашин. Автореф. ... докт. техн. наук. Москва, 1986. 32 с.

5. Букатый С.А. Прогнозирование коробления деталей ГТД после обработки поверхности на основе исследования остаточного напряжённого состояния материала. Автореф. ... докт. техн. наук. Рыбинск, 1996. 28 с.

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

RESIDUAL STRESS OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES WITH THE AIM OF ENSURING ADHESION OF NICKEL OR CHROMIUM COATINGS ON PARTS MADE OF TITANIUM ALLOYS

© 2018

A. S. Bukaty Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Strength of Materials;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
[bukaty@inbox.ru](mailto:bukatv@inbox.ru)

Work on ensuring adhesion of chromium coating on parts “piston with a rod” made of BT3-1, BT22 titanium alloys was carried out based on the examination of residual stresses. Ensuring the adhesion of coats was conducted in two stages: at the first stage strengthening treatment was used, and at the second stage optimization of grinding conditions by residual stresses was carried out. A method of predicting process-induced residual deformation by equivalent initial stresses is presented. Residual stresses in a surface layer of specimens cut out of the strengthened parts were studied. It was established that compressive residual stresses in the surface layer ensure the coating adhesion in chromium plating of parts made of titanium alloys. It was shown that ensuring adhesion of coatings on parts made of titanium alloys can be obtained both by strengthening treatment and without it, due to the optimization of grinding conditions. The results obtained made it possible to eliminate surface tempering in the process of grinding parts made of titanium alloys, to ensure favorable technological heredity not only for the parts under examination, but for other parts such as pistons, hydraulic cylinders and rods.

Strengthening treatment; grinding; coating adhesion; chromium plating; nickel plating; residual stresses.

Citation: Bukaty A.S. Residual stress optimization of technological processes with the aim of ensuring adhesion of nickel or chromium coatings on parts made of titanium alloys. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 3. P. 138-147. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-138-147

References

1. Bukaty A.S., Bukatyy S.A., Leshin D.P., Okrugin A.A. Sovershenstvovanie konstruksii i tekhnologii izgotovleniya otvetstvennykh detaley GTD na osnove energeticheskogo metoda i issledovaniya zhestkosti napryazhennogo sostoyaniya. *Sb. materialov IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyeni i aviadvigatelsestroeni (TM-2012)»*. Part 1. Rybinsk: Rybinsk State Aviation Technical University Publ., 2012. P. 308-312. (In Russ.)
2. Bukaty S.A., Semenchenko I.V. Buckling and size stability of low-hard thin-walled parts in gas turbine engines production. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 1994. No. 10. P. 32-37. (In Russ.)
3. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Gosudarstvennoe Nauchno-tekhnicheskoe Izdatel'stvo Mashinostroyitel'noy Literatury Publ., 1963. 232 p.
4. Ovseenko A.N. *Tekhnologicheskie osnovy metodov snizheniya ostatochnykh deformatsiy i obespecheniya kachestva obrabotki vysokonagruzhennykh detaley energomashin* [Process basis for methods of reducing residual deformations and ensuring high quality of treatment of high-load parts of energy machines. Extended abstract of doctoral dissertation (Engineering)]. Moscow, 1986. 32 p.
5. Bukaty S.A. *Prognozirovanie korobleniya detaley GTD posle obrabotki poverkhnosti na osnove issledovaniya ostatochnogo napryazhennogo sostoyaniya materiala* [Prediction of gas turbine engine parts' buckling after surface treatment on the basis of examination of the residual stress state of the material. Extended abstract of doctoral dissertation (Engineering)]. Rybinsk, 1996. 28 p.
6. Bukaty S.A. Obshchiy podkhod k opredeleniyu ostatochnykh deformatsiy detaley posle uprochneniya poverkhnostnym i ob'emnym plasticheskim deformirovaniem. *Sbornik tezisov dokladov respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Povyshenie kachestva detaley mashin plasticheskim deformirovaniem»*. Frunze, 1988. P. 88-90.
7. Bukaty S.A., Bukatyy A.S. Avtomatizirovannaya Sistema opredeleniya ostatochnykh napryazheniy. *Trudy XXXVIII Ural'skogo seminara «Mekhanika i protsessy upravleniya»*. V. 1. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Publ., 2008. P. 191-194. (In Russ.)