

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

*Рогов Н.В., Ковалев А.А.*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), Москва*

**Ключевые слова:** технологическая наследственность, газотермические покрытия, прочность сцепления, остаточные напряжения, технологические режимы.

**Аннотация.** Рассмотрены особенности изготовления деталей машин с газотермическими покрытиями, основанные на теории технологической наследственности. Предложен интегральный показатель качества, позволяющий оценивать свойства технологического процесса. Определены единичные показатели, от которых зависит интегральный показатель качества. Выбран метод контроля отдельных единичных показателей качества с учётом особенностей деталей с газотермическими покрытиями.

## MACHINE PARTS WITH THERMAL SPRAY COATINGS MANUFACTURING INTEGRAL QUALITY INDICATOR DETERMINATION

*Rogov N.V., Kovalev A.A.*

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

**Keywords:** technological heredity, thermal spray coatings, adhesion strength, residual stresses, technological conditions.

**Abstract.** Thermal spray coatings machine parts manufacture features are considered based on the technological heredity theory. Quality integral indicator has been determined, which makes it possible to evaluate the technological process properties. Single indicators are determined, on which the quality integral indicator depends. The individual single quality indicators control method was chosen, taking into account thermal spray coatings parts features.

При изготовлении ответственных деталей, к которым предъявляются повышенные требования с точки зрения обеспечения качества, необходимо учитывать технологическую наследственность – явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Сохранение этих свойств у деталей машин называют технологическим наследованием [1]. Учёт технологической наследственности важен на протяжении всего технологического процесса (ТП) изготовления детали, однако особую роль это явление приобретает на заключительных стадиях изготовления. Это связано с тем, что при повышенных требованиях к точности готовой детали возможность её обеспечения определяется значениями показателей качества, которые были достигнуты на предшествующих операциях. Если разрыв между значениями показателей качества, которые должны быть получены на  $n$ -й и  $(n - 1)$ -й операциях, слишком большой с точки зрения данного технологического метода, достижение требуемой точности изготовления не представляется возможным.

При проектировании технологического процесса существенной проблемой является формирование содержания операций и технологических переходов с

учётом взаимного влияния свойств. Профессором Дальским в [2] была предложена зависимость вида:

$$x_i = \frac{1}{k_{i(i-1)}} \cdot x_{i-1}, \quad (1)$$

где  $x_{i-1}$ ,  $x_i$  – характеристика свойства заготовки на операции  $(i-1)$  и  $i$  ТП соответственно;  $k_{i(i-1)}$  – коэффициент передачи свойства  $x$  от операции  $(i-1)$  к операции  $i$ .

Эта зависимость имеет фундаментальный характер и может применяться в отношении широкого спектра показателей качества, однако её использование для описания процесса наследования и взаимного влияния имеет ряд сложностей:

1) необходимо выбрать интегральный показатель качества, который будет учитывать наиболее значимые параметры заготовки, характеризующие её состояние на протяжении ТП;

2) требуются статистические данные о показателях качества заготовок с целью расчёта коэффициента передачи.

Все эти вопросы требуют индивидуального рассмотрения с учётом особенностей, связанных с изготовлением конкретной детали. В настоящей работе подробно будет рассмотрен первый из двух указанных выше вопросов. Рассмотрение этого вопроса проведено на примере изготовления деталей с газотермическими покрытиями (ГТП).

В настоящее время перспективным технологическим методом, позволяющим формировать эксплуатационные характеристики детали в широком диапазоне на заключительном этапе ТП, является нанесение ГТП. Укрупнённо для него можно выделить три стадии:

- 1) подготовка поверхности под нанесение покрытия (стадия I);
- 2) нанесение покрытия (стадия II);
- 3) механическая обработка покрытия (стадия III).

Остальные этапы ТП изготовления детали с ГТП являются неспецифическими. В силу этого выбор ГТП в качестве отделочно-упрочняющей обработки детали позволяет обеспечить гибкость как с точки зрения ТП, так и с точки зрения получаемых эксплуатационных характеристик готовой детали. При этом существенным ограничением, характерным для ТП изготовления детали с ГТП, является необходимость осуществления механической обработки после нанесения покрытия. На этой стадии существует риск снижения качества сформированного покрытия под воздействием силовых и температурных факторов, возникающих при механической обработке. Основным показателем, используемым для оценки качества покрытия, является прочность сцепления ( $\sigma_{сц}$ ) покрытия с основным материалом детали. Этот показатель формируется на всех трёх стадиях (I – III) ТП, связанных с нанесением покрытия:

I. Способ подготовки поверхности заготовки под нанесение покрытия определяет рельеф поверхности. Существующие способы подготовки [3-6] заключаются в увеличении площади контакта поверхности заготовки с покрытием путём искусственного создания неровностей. Чем больше суммарная площадь поверхности, тем выше будет  $\sigma_{сц}$ .

II. Метод нанесения покрытия, напыляемый материал, режимы напыления – всё это вносит значительный вклад в формирование физических свойств

покрытия. При этом если когезия нанесённого покрытия практически не зависит от особенностей подготовки поверхности под его нанесение, то адгезия находится в непосредственной зависимости от свойств заготовки, сформированных на предыдущей стадии.

III. Основной задачей механической обработки ГТП являются удаление дефектного поверхностного слоя покрытия и обеспечение требуемой шероховатости поверхности детали. При этом на данном этапе возрастает риск отслаивания покрытия. Для минимизации этого риска требуется подобрать рациональные режимы механической обработки, которые не будут снижать величину полученной на предыдущей стадии  $\sigma_{cy}$  [7,8].

Таким образом, в качестве интегрального показателя качества покрытия, который позволяет оценивать явления, связанные с технологической наследственностью, целесообразно выбрать  $\sigma_{cy}$ . Тогда (1) примет следующий вид:

$$\sigma_{cui} = \frac{1}{k_{i(i-1)}} \cdot \sigma_{cui(i-1)}. \quad (2)$$

При рассмотрении механизма снижения  $\sigma_{cy}$  в процессе механической обработки необходимо учитывать известную из [9] зависимость:

$$\sigma_{cy} = \sigma_{адг} - \sigma_{ост}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{адг}$  – величина адгезии на границе раздела «покрытие-основа»;

$\sigma_{ост}$  – результирующие остаточные напряжения в покрытии.

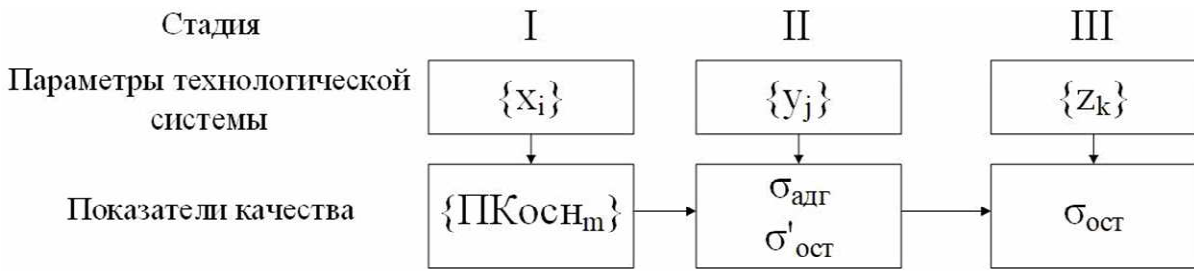
Величина  $\sigma_{адг}$  закладывается на этапе подготовки поверхности заготовки под нанесение покрытия и обеспечивается на этапе нанесения. Последующая механическая обработка практически не оказывает влияние на изменение этого параметра. Распределение  $\sigma_{ост}$  по глубине первоначально формируется на стадии нанесения покрытия. При механической обработке этот параметр часто претерпевает качественные (характер распределения по глубине) и количественные изменения. При этом, согласно (3), увеличение по модулю положительного значения  $\sigma_{ост}$  (растягивающее результирующее напряжение) приводит к снижению  $\sigma_{cy}$ , а увеличение по модулю отрицательного значения  $\sigma_{ост}$  (сжимающее результирующее напряжение) соответствует росту величины  $\sigma_{cy}$ . Рекомендации по расчёту результирующих остаточных напряжений в поверхностном слое на основании сведений о распределении остаточных напряжений по глубине приведены в [10].

Схематично формирование показателей качества покрытия с учётом взаимного влияния свойств приведено на рисунке 1.

Из приведённой схемы видно, что на стадии механической обработки возможно управление только показателем  $\sigma_{ост}$ . Это позволяет переписать (1-3) в виде системы:

$$\begin{cases} \sigma_{cy} = \sigma_{адг} - \sigma_{ост}, \\ \sigma_{адг} = f_1(\{x_i\}, \{y_i\}), \\ \sigma_{ост} = \frac{1}{k} \cdot \sigma'_{ост}, \\ \sigma'_{ост} = f_2(\{y_i\}), \end{cases} \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент передачи остаточных напряжений между стадиями II и III.



{x<sub>i</sub>} – параметры технологической системы на стадии подготовки поверхности заготовки под нанесение покрытия (режимы механической обработки основы); {y<sub>j</sub>} – параметры технологической системы на стадии нанесения покрытия (режимы напыления, параметры оборудования); {z<sub>k</sub>} – параметры технологической системы на стадии механической обработки покрытия (режимы окончательной механической обработки); {ПКосн<sub>m</sub>} – показатели качества поверхности основы после её подготовки к нанесению покрытия;

σ'<sub>ост</sub> – остаточные напряжения, возникающие в покрытии в результате его нанесения

Рис. 1. Факторы, оказывающие влияние на изменение величины σ<sub>сц</sub> в процессе нанесения покрытия

Для построения математической зависимости  $\sigma_{ост} = \frac{1}{k} \cdot \sigma'_{ост}$  из системы (4)

необходимо прибегнуть к оценке остаточных напряжений до и после механической обработки. Наиболее широко распространены следующие методы оценки остаточных напряжений [11-13]:

1. Механические методы – широкая группа методов, которая включает различные разрушающие методы контроля. Общей чертой этих методов является удаление части материала детали, в результате чего происходит изменение её напряжённого состояния, что влечёт за собой деформацию.

А. Метод Давиденкова представляет собой один из первых известных и наиболее простых способов измерения остаточных напряжений. Данный метод основан на разгрузке поверхностных слоёв материала детали путём их удаления в процессе электрохимического травления. Деформация регистрируется механическим датчиком. Метод позволяет измерять деформации лишь в одном направлении, что является его существенным ограничением.

В. Измерение остаточных напряжений с использованием сканеров. В данном методе удаление материала происходит путём вырезки небольшого отверстия. Деформация же регистрируется несколькими оптическими или механическими датчиками. Полученные данные о перемещениях сопоставляются с математическим эталоном (3D-модель), что позволяет учитывать пространственные деформации и судить о распределении остаточных напряжений в объёме детали (а не только в направлении одной оси, как в методе Давиденкова).

2. Рентгеновский метод – неразрушающий метод контроля, позволяющий измерять остаточные напряжения в различных направлениях на основании интерференционных эффектов рентгеновских лучей, отраженных от поверхности образцов [12]. Данный метод, в отличие от описанных выше, позволяет оценивать напряжения не только 1-го, но также 2-го и 3-го рода. Основным ограничением

метода является небольшая максимально допустимая глубина, на которой возможно измерение остаточных напряжений (порядка 10 мкм).

3. Методы, основанные на оценке неравномерности плотности материала. К данной группе относятся методы, различные по природе воздействия на образец. Так, например, бывают ультразвуковые и электромагнитные методы, но одним из наиболее перспективных является лазерно-акустический. Данный метод заключается в воздействии на поверхность заготовки лазерными импульсами и фиксации при помощи акустических датчиков колебаний, возникающих в заготовке в результате воздействия. В зависимости от распределения плотности заготовки в каждом её сечении наблюдаются различные длины акустических волн. При этом данные о распределении плотности позволяют судить о присутствующих в результате этой неоднородности остаточных напряжениях в материале. Ограничением данного метода является необходимость точной тарировки прибора на конкретный диапазон значений остаточных напряжений. Так, невозможно в рамках одного опыта измерить и сжимающие, и растягивающие остаточные напряжения.

В приведённой выше классификации указаны ограничения, относящиеся к самим методам, однако следует отметить, что особенности структуры ГТП определяют ряд специфических свойств остаточных напряжений, возникающих в покрытиях. Среди таких особенностей наиболее значимы следующие [3-6, 9].

1. Знак остаточных напряжений зависит от режимов напыления. При высоких температурах (выше температуры плавления) в покрытии формируются напряжения растяжения, а при более низких температурах – напряжения сжатия.

2. Высокая пористость материала покрытия оказывает влияние на перераспределение остаточных напряжений в поверхностном слое при механической обработке.

3. Материал покрытия отличается высокой степенью анизотропии в силу особенностей технологического процесса его формирования, что является причиной неоднородности распределения остаточных напряжений в различных направлениях покрытия [14].

Таким образом, к методам оценки остаточных напряжений в газотермических покрытиях можно сформировать следующие требования:

1) возможность качественной и количественной оценки величины остаточных напряжений в широком диапазоне;

2) возможность оценки остаточных напряжений по всей толщине покрытия и в различных направлениях (объёмная оценка).

Из приведённых ранее методов оценки данным требованиям наиболее соответствует метод измерения остаточных напряжений с использованием сканеров. Этот метод обеспечивает возможность оценки напряжений различного знака и в различных направлениях и не имеет существенных ограничений по глубине.

Таким образом, качество ГТП характеризуется показателем  $\sigma_{сш}$ , учёт которого позволяет рассматривать процесс изготовления детали с покрытием с позиций теории технологической наследственности. При обработке детали после нанесения покрытия особую важность приобретает показатель  $\sigma_{ост}$ , от которого

зависит интегральный показатель  $\sigma_{сц}$ . В результате анализа существующих методов оценки остаточных напряжений было установлено, что метод измерения с использованием сканеров является наиболее подходящим для контроля деталей с ГТП. На следующем этапе исследования необходимо определить коэффициенты передачи свойств на основании статистических данных обработки деталей с ГТП, применяя методы математического моделирования.

### Список литературы

1. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. Дальский А.М. Технологическое обеспечение высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.
3. Газотермическое напыление: учеб. пособие / кол. авторов; под общей ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
4. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
5. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 357 с.
6. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А. и др. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. – К.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
7. Ковалев А.А. Влияние параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий / А.А. Ковалев, А.С. Краско // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 3. – С. 31-39.
8. Ковалев А.А. Исследование влияния параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий / А.А. Ковалев, А.С. Краско // Технология металлов. – 2022. – № 1. – С. 14-22.
9. Балдаев Л.Х. Газотермическое напыление порошковых материалов для получения защитных покрытий с заданными свойствами: дисс. ... докт. техн. наук. – Курск, 2009. – 317 с.
10. Васильков Д.В. Упругое последствие в деталях при высокоскоростной обработке резанием / Д.В. Васильков, Т.Б. Кочина // Металлообработка. – 2014. – № 2(80). – С. 2-10.
11. Антипов А.К. Измерение остаточных напряжений деталей машин / А.К. Антипов, Г.О. Шустов // Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве: Сборник научных трудов по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции, Кинель, 11 декабря 2020 года. – Кинель: Самарский государственный аграрный университет, 2021. – С. 66-71.
12. Технологические остаточные напряжения / Под ред. А.В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
13. Исследование влияния остаточных напряжений на усталостную прочность образцов из титановых и никелевых сплавов / М.Г. Яковлев, В.А. Горелов, Н.С. Меркулова, А.С. Кудров // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 5. – С. 47-51.
14. Ковалев А.А. Оценка рассеяния значений показателя качества в зависимости от параметров технологического процесса / А.А. Ковалев, Н.В. Рогов // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28. – № 1. – С. 175-186.

### Сведения об авторах:

*Рогов Николай Вадимович* – аспирант;

*Ковалев Артем Александрович* – к.т.н., доцент.