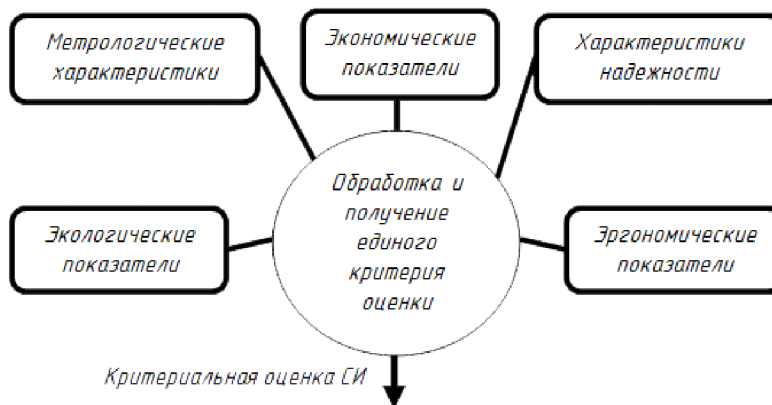


○ показатели эргономики.



**Рисунок 1 – Предлагаемые области оценки параметров СИ**

Использование выбора СИ, основанного на критериальной оценке каждой из данных областей и закреплённого в стандарте организации, позволит метрологической службе объективно выбирать оптимальные СИ, в современных условиях гибкого и диверсифицированного рынка средств измерений, широких возможностей перенастройки СИ и желания поставщиков модифицировать продукцию под потребности заказчика.

#### Литература

1. ГОСТ 8.009-84 ГСОЕИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
2. ГОСТ 8.051-81 ГСОЕИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм.
3. ГОСТ 22261-94 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.
4. РД 50-98-86 Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (По применению ГОСТ 8.051-81).
5. РД 50-453-84 Методические указания. Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета.
6. МИ 1967-89 Рекомендация. ГСИ. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения.
7. МИ 2232-2000 Рекомендация. ГСОЕИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации.
8. МИ 2233-2000 Рекомендация. ГСОЕИ. Обеспечение эффективности измерений, выполняемых в технологических процессах для контроля, диагностики, учета количества, оптимизации режимов и реализации других функций управления, в том числе в АСУТП.
9. МИ 2267-2000 Рекомендация. ГСОЕИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации.

#### **Анализ погрешностей измерителя и объекта при определении остаточных напряжений**

к.т.н. Яковлев М.Г.  
ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»  
maxx81@list.ru.

**Аннотация.** Статья посвящена выявлению погрешностей измерителя и объекта при определении остаточных напряжений в деталях газотурбинных двигателей, а также проведен анализ влияния состояния поверхностного слоя на измеряемые остаточные напряжения.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения, погрешность, шероховатость, поверхностный слой, качество.

В современной технике и технологии просматривается тенденция по созданию и применению все более нагруженных и ответственных изделий. Наиболее последовательно эта тенденция отражается в газотурбостроении, где возникла и остро стоит проблема оценки полезных свойств материалов и устройств путем определения погрешностей, присущих объекту измерения и средствам измерения. В работе на примере определения остаточных напряжений выполнена оценка и приведено разделение погрешностей измерителя (установка МерКулОН «Тензор») и объекта измерения (поверхностный слой деталей или образцов).

Остаточные напряжения возникают в детали в результате неравномерной упругопластической деформации, в процессе формирования заготовки, механической обработки детали, упрочнения её поверхностных слоёв. В разных частях детали остаточные напряжения находятся в равновесии, и нарушение этого равновесия ведёт либо к их перераспределению, либо к изменению формы детали, её короблению.

В зависимости от условий обработки поверхности остаточные напряжения в поверхностных слоях могут иметь различную глубину залегания и различную величину по разным направлениям вдоль поверхности.

Несущая способность и особенно сопротивление усталости деталей во многом определяются прочностью поверхностного слоя. Основные признаки технологической наследственности, которые контролируются в процессе производства особо ответственных деталей, следующие [1, 2]:

- шероховатость поверхности;
- степень и глубина наклёпа;
- структура поверхностных слоёв;
- величина, знак и распределение по глубине залегания остаточных напряжений.

Прямой и наиболее надёжным способом определения остаточных напряжений является разрушающий механический метод Калакутского-Давиденкова. Механический метод определения остаточных напряжений 1-го рода – это разрушающий метод, основанный на вырезке образца из детали, послойном удалении исследуемых слоёв путём электрохимического травления. При этом в образце происходит нарушение равновесия сил, в результате чего образец деформируется. По изменению величины деформации с изменением глубины залегания исследуемых слоёв рассчитывают остаточные напряжения.

Перечисленные этапы процесса определения остаточных напряжений позволяют применять различные средства осуществления механического метода. Поэтому имеется большое разнообразие установок контроля остаточных напряжений, начиная от ПИОН-а [3], получившего широкое внедрение в 60-е годы, и кончая автоматизированными системами в настоящее время. До сих пор в литературе встречаются работы, выполненные на приборе ПИОН с ручной обработкой графика деформации и расчетом остаточных напряжений по упрощенной формуле.

Расчет остаточных напряжений в призматических образцах в современных установках производится по формуле (1) Биргера И.А. [4].

$$\sigma_{н.л.} = \left( \frac{4 \cdot E}{3 \cdot L_{TP}^2 \cdot K_Y} \right) \cdot \left[ (H - a_i)^2 \cdot \left( \frac{dF}{da} \right) - 4 \cdot (H - a_i) \cdot F_{a_i} + 2 \int_0^{a_i} F(\xi) \cdot d\xi \right], \quad (1)$$

где:  $\sigma_{н.л.}$  – текущее значение осевых остаточных напряжений (нелинейная составляющая), МПа;

$E$  – модуль упругости, МПа;

$K_Y$  – коэффициент усиления деформации;

$L_{TP}$  – длина стравленного слоя, мм;

$H$  – толщина образца, мм;

$F_B$  – прогиб образца при вырезке, мм;

$\varepsilon_e$  – относительное удлинение образца при вырезке;

$F$  – текущее значение деформации образца, мм;

$\frac{dF}{da}$  – изменение деформации с изменением глубины залегания исследуемых слоёв;

$a_i$  – глубина удаленных слоев на текущий момент, мм;

$\xi_i$  – суммарная деформация образца на текущий момент, мм.

При расчетах учитывается часть напряжений, релаксировавших при вырезке образца по прогибу и удлинению, и те напряжения, которые релаксировали в результате удаления предыдущих слоев в процессе определения остаточных напряжений.

Возможно также определение остаточных напряжений не только в призматических образцах, а и в образцах сложной формы, вырезанных из конструктивных элементов деталей [1]:

- отверстия,
- галтельные переходы,
- ёлочный замок,
- кромка пера лопатки,
- в образцах с электропроводящими покрытиями.

Для определения остаточных напряжений механическим методом в НИИД создана установка МерКулОН «Тензор» [5, 6] (рисунок 1).

Управление процессом контроля остаточных напряжений производится персональным компьютером в реальном масштабе времени.

Несмотря на более чем вековое применение механического метода, до сих пор не установлены метрологические характеристики средств контроля в связи с отсутствием эталона или независимого аттестованного устройства, не установлена точность контроля.

По ГОСТ Р 8.563-96 источники погрешностей могут быть:

- методические,
- инструментальные,
- субъективные.

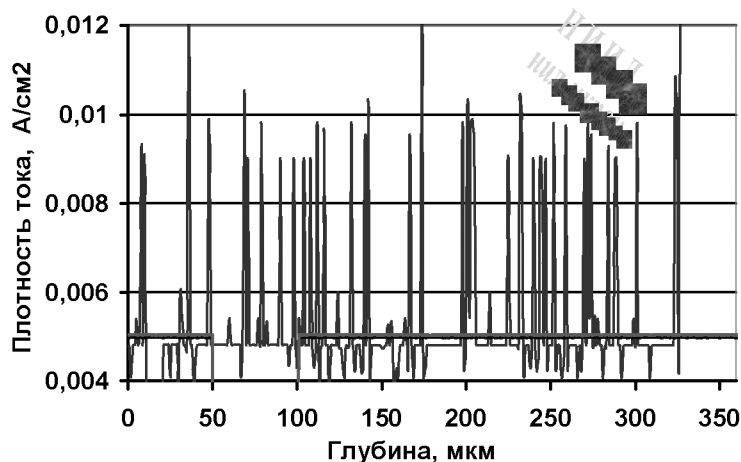
Нами были проанализированы и выявлены указанные источники погрешностей для каждого из этапов процесса определения остаточных напряжений:

- процесс травления;
- определение глубины залегания остаточных напряжений;
- регистрация деформации;
- расчеты (методические).

Существующие и применяемые в промышленности установки не аттестованы.



**Рисунок 1 – Внешний вид установки МерКулОН «Тензор»**



**Рисунок 2 – Изменение тока в процессе травления**

Анализ патентных и технических источников информации показал, что не лишены существенных недостатков даже современные установки определения остаточных напряжений.

Часто используют некорректный состав электролита и режимы травления, что вызывает разогрев в процессе травления, приходится изобретать охлаждающие устройства [7, 8] и корректировать показания тензодатчиков, измеряющих деформацию образца с изменением температуры электролита. Стабилизатор тока Б5-47, использованный в установке для определения остаточных напряжений, описан в работе, по своим характеристикам близок к приборам, которые стоят в установках АСКОН КАИ и ПОВКОН «Тензор» НИИД. Сравнительная характеристика записи тока при травлении образцов из сплава У8 в режиме поддержания постоянства тока на стабилизированном источнике тока В7-21А, установки ПОВКОН «Тензор» и установки МерКулОН «Тензор-3» с гальваностатом ЭЛ-02, разработанным в институте Электрохимии РАН представлена на рисунке 2. Высокая степень поддержания постоянства тока гальваностатом (горизонтальная прямая рисунок 2) обеспечивает постоянство скорости травления и высокую точность расчета глубины залегания исследуемых слоев.

При разработке комплекса МерКулОН «Тензор» проанализированы и сведены до минимума погрешности на всех этапах процесса определения остаточных напряжений. Оптимизация процесса достигнута за счет:

- разработки специального электролита, унифицированного для различных сплавов,
- создания специальных режимов травления, управляемых быстродействующим прибором с обратной связью,
- учёта тонкостей начального этапа травления,
- «толчка» деформации от перезарядки двойного слоя в момент включения тока травления,
- автоматизации погружения образца в электролит, в результате чего оптимизирован промежуток времени между погружением образца, включением тока травления и началом регистрации деформации,
- использования приборов для травления образцов и измерения деформации, имеющих прямую связь с ПК,
- расширения возможности контроля остаточных напряжений путем определения остаточных напряжений на образцах с электропроводящими покрытиями,
- программы расчета остаточных напряжений, учитывающей параметры покрытия и основы и обеспечения расчета остаточных напряжений не только в покрытии, но и в основе,
- осуществления возможности определения остаточных напряжений в образцах сложной формы, вырезанных из конструктивных элементов деталей [9],
- обеспечения программой также возможности расчета остаточных напряжений в кольцевых образцах при травлении как внутренней, так и наружной поверхностей кольца,
- формирования массива эпюр остаточных напряжений, доступного для любого комбинирования по технологическим параметрам и для дальнейшей статистической обработки.

В результате проделанной работы на установке МерКулОН «Тензор» сведены к минимуму все источники погрешностей:

- *методические* погрешности механического метода за счет применения наиболее точных формул расчета, основанных на теории упругости;
- *инструментальные* погрешности благодаря совершенствованию всех этапов определения остаточных напряжений;
- *субъективные* погрешности за счет компьютеризации процесса определения остаточных напряжений и программной обработки данных без участия оператора.

МерКулОН «Тензор-3» утвержден как тип единичного средства измерения в Управлении метрологии Ростехрегулирования (ГОССТАНДАРТ), внесен в реестр № 33350-06, допущен к применению в РФ.

Разработана техническая документация:

- Программа испытаний № 01.102.123,
- Инструкция № 05.100.105,
- Руководство по эксплуатации № 09.102.125,
- Методика подготовки образцов №05.102.202,

## ○ Методика поверки.

Для оценки точности метода контроля были изготовлены контрольные образцы в виде втулок с толщиной стенок 2 мм, диаметром 70 мм и высотой 70 мм с последующим изготовлением однородных призматических образцов [10]. После чистовой токарной обработки внутренней и внешней поверхностей втулки производили стабилизирующий отжиг для снятия напряжённого состояния. Затем наружную поверхность каждой втулки подвергали обработке по исследуемой технологии. Из втулок на электроэрозионном станке на мягких режимах вырезали образцы по образующей размером 60 x 4 x 2 мм. Для каждой партии образцов (25-30 шт.) производили определение эпюр остаточных напряжений, статистическую обработку результатов измерений и строили поле доверительного интервала эпюры остаточных напряжений. Исследования были проведены на контрольных образцах одиннадцати партий для двух материалов после упрочнения микрошариками, алмазного выглаживания, шлифования лентой и кругом.

Работа по установлению точности метода определения остаточных напряжений привела к выводу о том, что погрешности результатов измерения остаточных напряжений связаны не только с точностью средств контроля, но и с природой исследуемого материала и способа его обработки, т.е. имеют место между исследуемыми параметрами не только вероятностные связи, но и функциональные.

Для выявления этих связей, нахождения математических зависимостей и возможностей интерпретации применён корреляционный анализ. Корреляционные связи находили между глубиной залегания остаточных напряжений в качестве независимой переменной и величиной дисперсии математического ожидания остаточных напряжений

Форма корреляционной связи величины дисперсии остаточных напряжений с глубиной их залегания выражалась в виде кривой регрессии: линейной, квадратичной, полиномом общего вида (до 5 степени), степенным законом, показательным законом (с ненулевой асимптотой).

Наилучшее совпадение результатов установлено для линейного уравнения регрессии в виде:

$$\ln(D - \beta_2) = \gamma_0 + \gamma_1 \cdot \alpha.$$

То есть зависимость между величиной дисперсии и глубиной залегания описывается показательным законом с ненулевой асимптотой.

Величины коэффициентов корреляции для разных материалов и способов их обработки составляют от -0,804 до -0,988.

Асимптота  $\beta_2$  интерпретирована как значение дисперсии, обусловленное точностью метода контроля остаточных напряжений. Для использованной установки и исследованных материалов среднеквадратическое отклонение результата измерения, обусловленное средствами контроля, составило величину 20 и 4 МПа для никелевого и алюминиевого сплава соответственно.

Проведённые исследования показали, что статистический анализ результатов, измерений остаточных напряжений на контрольных образцах позволяет оценить погрешность средств контроля, отделив её от погрешности, связанной с нестабильностью состояния поверхностных слоёв, обусловленной нестабильностью технологического процесса обработки детали.

Учитывая опыт прошлых лет и используя новые разработки, проведена работа (совместно с ВНИИОФИ), в которой выявлены метрологические характеристики средств определения остаточных напряжений. Успешность этой работы, завершившейся сертификацией МерКулОН "Тензор-3", обеспечили специально изготовленные тестовые образцы-пластины и стабильная работа МерКулОН "Тензор-3" по показателям поддержания заданных параметров процесса. Тестовые образцы были изготовлены из типичных для авиационного двигателестроения материалов на основе железа, никеля, титана и алюминия. Часть образцов прошла дополнительный отжиг.

На всех пластинах измерена шероховатость и установлено, что значение шероховатости

по 88 измерениям составляет величину  $Ra=0,808$ ,  $СКО=0,224$ ,  $ДОВ=0,232$  (при доверительной вероятности  $P=0,95$ ), коэффициент вариации составляет 27,7%. Расчёты аналогичных величин для отдельных групп исследованных металлов дают близкие значения. Такое согласие обусловлено тем, что все образцы прошли один технологический маршрут.

Распределение по глубине остаточных напряжений определяли на установке МерКулОН «Тензор-3». Для каждой из семи партий образцов получено по 16 эпюр остаточных напряжений.

Экспериментально-статистическим методом в соответствии с ГОСТ 8.207-76 и ГОСТ Р ИСО–5725 проведено определение границ абсолютной погрешности измерения остаточных напряжений.

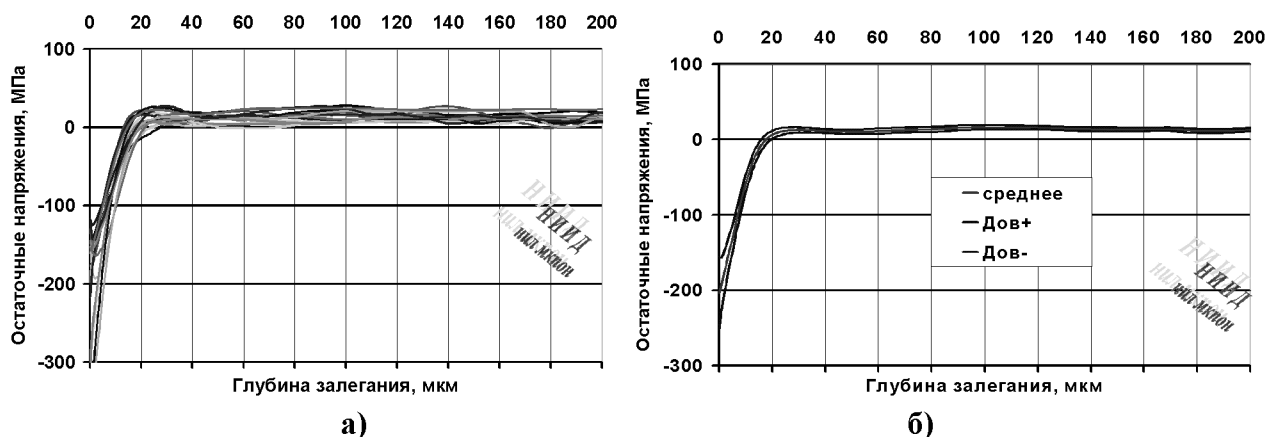
Выполнены статистические расчёты:

- среднего арифметического значения результатов измерений остаточных напряжений для 16 исследованных образцов каждого сплава,
- среднеквадратического отклонения результатов измерения остаточных напряжений,
- доверительные границы (без учета знака) случайной погрешности результата измерения остаточных напряжений,
- границы неисключённой систематической погрешности результата измерения остаточных напряжений,
- композиции распределений случайной и систематической погрешности,
- суммарного среднеквадратического отклонения результата измерений.

Для исследованных материалов подтверждена гипотеза о нормальности распределения результатов измерения остаточных напряжений по составному критерию, величина которого находится в интервале  $0,6829 < d \leq 0,9137$ .

Отношение для определения границ абсолютной погрешности (среднее по всем глубинам) результата измерения остаточных напряжений для семи исследованных партий образцов находится в интервале 0,92 – 1,98. Следовательно, согласно ГОСТ 8.207-76, для оценки распределения по глубине абсолютной погрешности измерений остаточных напряжений необходимо было рассчитать композицию распределений случайной и систематической погрешности, что и сделано для эпюр всех партий материалов.

На рисунках 3 и 4 приведены примеры 16 эпюр и результаты их статистической обработки для алюминиевого и никелевого сплавов, на которых видно также изменение распределения остаточных напряжений в результате отжига алюминиевого сплава (рисунок 4).

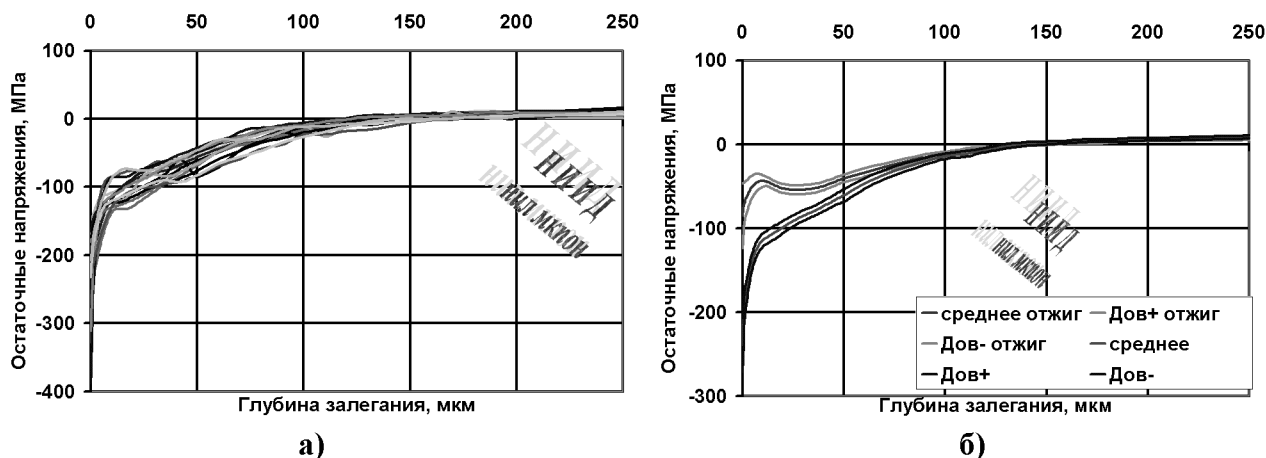


**Рисунок 3 – Эпюры остаточных напряжений (а) и доверительные интервалы погрешности (б) для никелевого сплава**

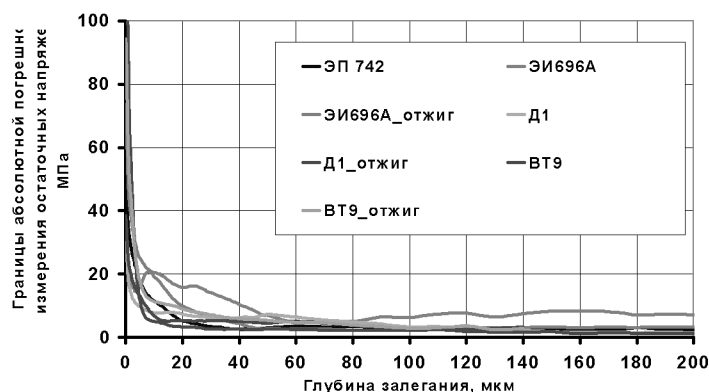
Характерно то, что доверительный интервал (или погрешности) измерения остаточных напряжений для разных материалов изменяется единообразно с глубиной залегания (рисунок 5)

Для всех групп наблюдали стабилизацию и снижение величины распределения погрешностей с глубиной залегания остаточных напряжений. Это указывает на то, что погрешности

связаны с особенностями свойств поверхностных слоёв исследуемых материалов и слабо зависят от средств определения остаточных напряжений. Полученные результаты привели к выводу, что погрешности данных средств контроля остаточных напряжений составляют величину менее 10 МПа.



**Рисунок 4 – Эпюры остаточных напряжений (а) и доверительные интервалы погрешности (б) для алюминиевого сплава до и после отжига**

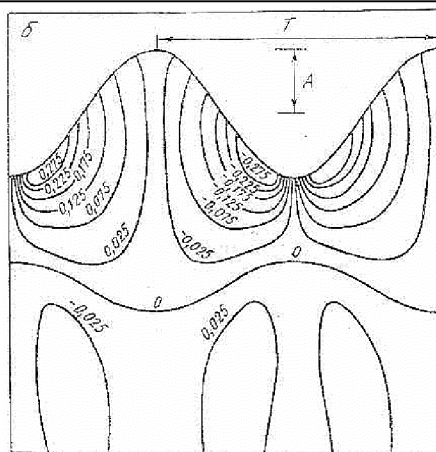


**Рисунок 5 – Доверительные интервалы погрешности для всех исследованных групп материалов**

В ряде экспериментов установлено, что дисперсия остаточных напряжений вблизи поверхности зависит от её шероховатости. В данной серии экспериментов (рисунок 5) исходная шероховатость для всех образцов была одинаковая.

В электрохимии широко проводятся исследования изменения шероховатости поверхности при различных процессах растворения и осаждения металлов. Обобщение данных, приведенных в обзоре [11], показало, что в начале процесса анодного растворения металлов происходит изменение шероховатости поверхности электрода. Сделан вывод, что чем короче длина волны шероховатости, тем быстрее она сглаживается. Авторы предлагают качественное объяснение результатов, основанное на предположении, что в нулевом приближении линии электрического поля могут считаться параллельными и равномерно расположенными перпендикулярно плоскости электродов. Учёт кривизны поверхности приводит к тому, что в точках, где поверхность выпукла, напряжённость поля усиливается по сравнению с полем на плоской поверхности. Для коротковолновых шероховатостей большее различие в напряжённости электрического поля в максимумах и минимумах профиля. В результате растворение коротковолновых шероховатостей происходит быстрее.

Эти представления совпадают с теорией о распределении напряжений на шероховатой поверхности, изображенные на рисунке 6 в виде компоненты тензора напряжений в приповерхностном слое [12]. Величины изолиний напряжений даны в относительных единицах  $\sigma/\sigma_0$ .



**Рисунок 6 – Распределение напряжений на поверхности**

Аналогичные явления должны протекать и в процессе травления образцов при определении остаточных напряжений. Исследования показали, что с величиной шероховатости исходной поверхности ( $R_a$ ) связано изменение дисперсии результатов определения остаточных напряжений [13]. Начиная с некоторой глубины, дисперсия остаточных напряжений не зависит от шероховатости. Эту глубину можно определить корреляционной зависимостью между дисперсией и шероховатостью.

Таким образом, показано, что на начальном участке травления погрешности в значительной степени обусловлены шероховатостью поверхности.

Кроме того, известно, что поверхностный слой до глубины порядка 50-100 мкм включает в себя наследственность технологического процесса и имеет менее стабильное состояние, чем основа, что подтверждено различной величиной погрешностей для разных материалов на разных глубинах (рисунок 5).

Таким образом, проведено разделение погрешностей измерителя и объекта измерения с помощью статистического анализа многократных измерений. Это позволило, с одной стороны, определить погрешность метода, а с другой стороны, оценить стабильность технологического процесса, не искаженную погрешностями средств контроля.

### Литература

1. Технологические остаточные напряжения. / Под ред. Подзей А.В. М. Машиностроение, 1978. 216с.
2. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993.
3. Рахмарова М.С., Мирер Я.Г. Влияние технологических факторов на надежность лопаток газовых турбин. М., Машиностроение, 1966.
4. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М. Машгиз, 1963. 232 с.
5. Меркулова Н.С. Контроль поверхностных остаточных напряжений в металлах и покрытиях. / Гальванотехника и обработка поверхности, 1993, т. 2, № 5, с. 46-52.
6. Меркулова Н.С., Иванова Т.О., Гринченко М.И. Совершенствование средств контроля поверхностных остаточных напряжений и их метрологическая аттестация. / Упрочняющие технологии и покрытия, 2006, № 3, с. 35-42.
7. Паринов М.В. Разработка экспериментальной автоматизированной установки исследования внутренних напряжений в деталях с покрытиями. / Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса. 2005. № 3, с. 66-70.
8. Паринов М.В., Чижов М.И. Экспериментальная установка для исследования внутренних напряжений в покрытиях, полученных методом гальваномеханического покрытия. / Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса. 2005. № 4, с. 9-12.
9. Меркулова Н.С., Гринченко М.И. Программное обеспечение контроля поверхностных остаточных напряжений на автоматизированной установке ПОВКОН «Тензор». / Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» 22-23 окт. 2002, МАТИ, М., с. 35-36.



10. Меркулова Н.С., Васильева М.Н., Бурмистрова М.И. Оценка точности механического метода определения остаточных напряжений. // Качество поверхностного слоя деталей машин. Сб. докл. Н-Пр конф. С.-Петербург, 2003, 24-26 июня. с. 113-115.
11. Гамбург Ю.Д., Давыдов А.Д., Харкац Ю.И. Изменение шероховатости поверхности при анодном растворении и катодном выделении металлов (обзор). // Электрохимия, том 30, № 4, 1994, с. 422-443.
12. Чистяков А.М., Иванов С.А. Распределение напряжений вблизи волнообразной поверхности и её влияние на результаты рентгеновской тензометрии. // Заводская лаборатория. 12, 1987, с. 41-44.
13. Меркулова Н.С., Иванова Т.О. Патент № 2287146 Способ определения вида обработки детали.