

**EESTI PÕLLUMAJANDUSE AKADEEMIA  
ЭСТОНСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ**

---

**EESTI PÕLLUMAJANDUSE AKADEEMIA  
TEADUSLIKE TÖÖDE KOGUMIK**

**PÕLLUMAJANDUSE KOMPLEKSNE MEHHAANISEERIMINE  
EESTI NSV TINGIMUSTES**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ  
ЭСТОНСКОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКАДЕМИИ**

**КОМПЛЕКСНАЯ МЕХАНИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ЭСТОНСКОЙ ССР**

**61**

**TARTU 1969**

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЖЕЛЕЗНЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКОСТЕННОГО ТРУБЧАТОГО КАТОДА

Кандидат технических наук Я. Кыо

и. о. доцента кафедры строительной механики ЭСХА

Метод деформации тонкостенного трубчатого катода [1] был нами использован для исследования собственных напряжений в железных гальванических покрытиях, применяемых при восстановлении изношенных деталей машин. Ниже приведены методика и результаты этих исследований.

## 1. Расчетные формулы и методика обработки данных эксперимента

Метод деформации тонкостенного трубчатого катода основан на расчете собственных напряжений по деформации, замеренной проволочными датчиками сопротивления на внутренней поверхности катода при наращивании исследуемого покрытия. Приводим выведенные в работе [1] основные расчетные формулы этого метода и рассмотрим методику обработки результатов измерений.

Введем следующие обозначения:

- $\sigma_{п}, \sigma_{к}$  — собственные напряжения в покрытии (индекс п) и в катоде (индекс к);
- $\sigma_0$  — напряжение в пограничном слое покрытия;
- $h_{п}, h_{к}$  — толщины покрытия и катода (рис. 1);
- $h$  — текущая толщина покрытия (рис. 1);
- $z'$  — расстояние от поверхности катода до рассматриваемого слоя покрытия (рис. 1);
- $\zeta = h/h_{к}$  — безразмерная текущая толщина покрытия;
- $k = h_{п}/h_{к}$  — отношение толщин покрытия и катода;
- $\eta = z'/h_{к}$  — безразмерное расстояние;
- $E_{п}, \mu_{п}$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона металла покрытия;

$E_k, \mu_k$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона металла катода.

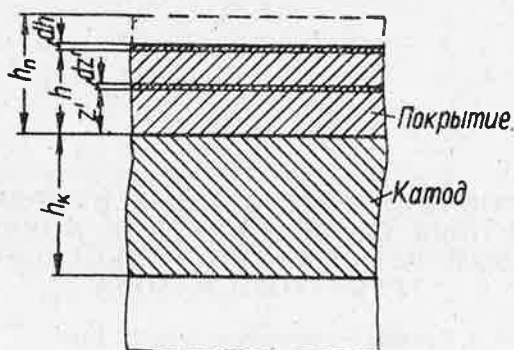


Рис. 1.

Зависимость напряжения в пограничном слое от текущей толщины покрытия выражается дробно-линейной функцией

$$\sigma_0 = \sigma_0(0) \frac{1 + \nu \xi}{1 + c\nu \xi}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0(0)$  — напряжение в пограничном слое покрытия в начальный момент наращивания ( $\xi = 0$ );  $c$  — безразмерный параметр, показывающий характер изменения напряжения  $\sigma_0$  в процессе наращивания;  $\nu$  — параметр, вычисляемый по формуле

$$\nu = \frac{E_{\text{п}}}{E_k} \cdot \frac{1 - \mu_k}{1 - \mu_{\text{п}}}. \quad (2)$$

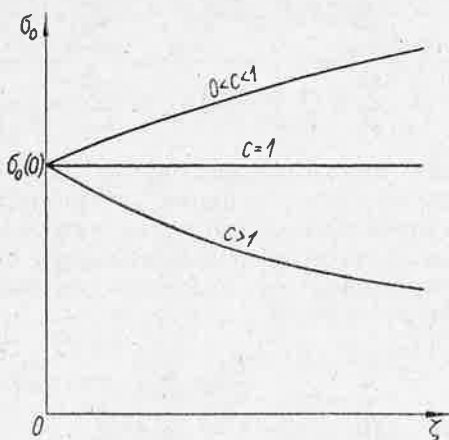
Влияние изменения параметра  $c$  на характер зависимости (1) иллюстрируется рис. 2. При  $c = 1$  напряжение  $\sigma_0$  сохраняет в процессе наращивания постоянное значение, при  $0 < c < 1$  — монотонно возрастает, а при  $c > 1$  — монотонно убывает. Параметр  $\sigma_0(0)$  определяет масштаб по оси  $\sigma_0$ .

Формулы для расчета собственных напряжений в покрытии и в катоде имеют вид

$$\sigma_{\text{п}} = \sigma_0(0) \left( \frac{1 + \nu \eta}{1 + c\nu \eta} - \frac{1}{c} \ln \frac{1 + c\nu k}{1 + c\nu \eta} \right); \quad (3)$$

$$\sigma_k = - \frac{\sigma_0(0)}{c\nu} \ln(1 + c\nu k). \quad (4)$$

Зависимость деформации катода  $\epsilon_k$  от текущей толщины покрытия выражается логарифмической функцией



Р и с. 2.

$$\varepsilon_{ki} = -\sigma_0(0) \frac{1 - \mu_{\Pi}}{cE_{\Pi}} \ln(1 + cv\xi). \quad (5)$$

Обработка результатов измерений заключается в определении параметров  $c$  и  $\sigma_0(0)$  по экспериментальным значениям деформации катода  $\varepsilon_{ki}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), соответствующим различным значениям безразмерной текущей толщины покрытия  $\xi_i$ .

Используя для определения параметров  $c$  и  $\sigma_0(0)$  метод равных сумм [2], разобьем имеющиеся  $n$  экспериментальных значений  $\varepsilon_{ki}$  на две равные или почти равные группы в порядке возрастания значений  $\xi_i$ . Приравнивая для каждой группы суммы экспериментальных и теоретических значений деформации, получаем уравнения

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \varepsilon_{ki} &= \sigma_0(0) \frac{1 - \mu_{\Pi}}{cE_{\Pi}} \sum_{i=1}^m \ln(1 + cv\xi_i), \\ \sum_{i=m+1}^n \varepsilon_{ki} &= \sigma_0(0) \frac{1 - \mu_{\Pi}}{cE_{\Pi}} \sum_{i=m+1}^n \ln(1 + cv\xi_i), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $m$  — число экспериментальных и теоретических значений деформации в первой группе.

Исключая из системы (6) делением параметр  $\sigma_0(0)$ , получаем уравнение

$$\omega = \frac{\sum_{i=m+1}^n \ln(1 + cv\xi_i)}{\sum_{i=1}^m \ln(1 + cv\xi_i)} = \frac{\sum_{i=m+1}^n \varepsilon_{ki}}{\sum_{i=1}^m \varepsilon_{ki}}, \quad (7)$$

которое содержит только неизвестное  $c$ . Для решения этого уравнения найдем значения функции  $\omega$  для нескольких значений  $c$ . По этим значениям можно путем интерполирования или графически найти искомое значение параметра  $c$ .

Складывая выражения (6), получаем для вычисления параметра  $\sigma_0(0)$  формулу

$$\sigma_0(0) = \frac{cE_{\Pi} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ki}}{1 - \mu_{\Pi} \sum_{i=1}^n \ln(1 + cv\xi_i)}. \quad (8)$$

После того как параметры  $c$  и  $\sigma_0(0)$  найдены, из выражения (1) определяется напряжение в пограничном слое покрытия, а из выражений (3) и (4) — собственные напряжения в покрытии и в катоде.

## 2. Опытная установка

Опытная установка (рис. 3) состоит из прибора для измерения собственных напряжений, который можно назвать трубчатым контрактометром, и установки для железнения.

Основным элементом трубчатого контрактометра является тонкостенный трубчатый катод 1, к которому привинчена компенсационная трубка 3. Снизу и сверху катод с компенсационной трубкой закрывается крышками 4 и 6. К верхней крышке привинчена выводная трубка 7, которая одновременно служит подвеской контрактометра во время измерений. Участки контрактометра, находящиеся в электролите и не подлежащие покрытию металлом, изолировались бакелитовым лаком.

Деформация катода измерялась проволочными датчиками сопротивления, включенными по мостовой схеме с отсчетом по измерителю тока. Рабочий датчик 2 и компенсационный датчик 5, приклеенные соответственно к внутренней поверхности катода и компенсационной трубки, включались в соседние плечи измерительного моста. Два смежных плеча моста, служащие для балансировки, выполнялись в виде датчиков 10, наклеенных на двух сторонах изгибаемой винтом 12 балочки 11. В качестве измерителя тока 8 использовался микроамперметр типа М-95.

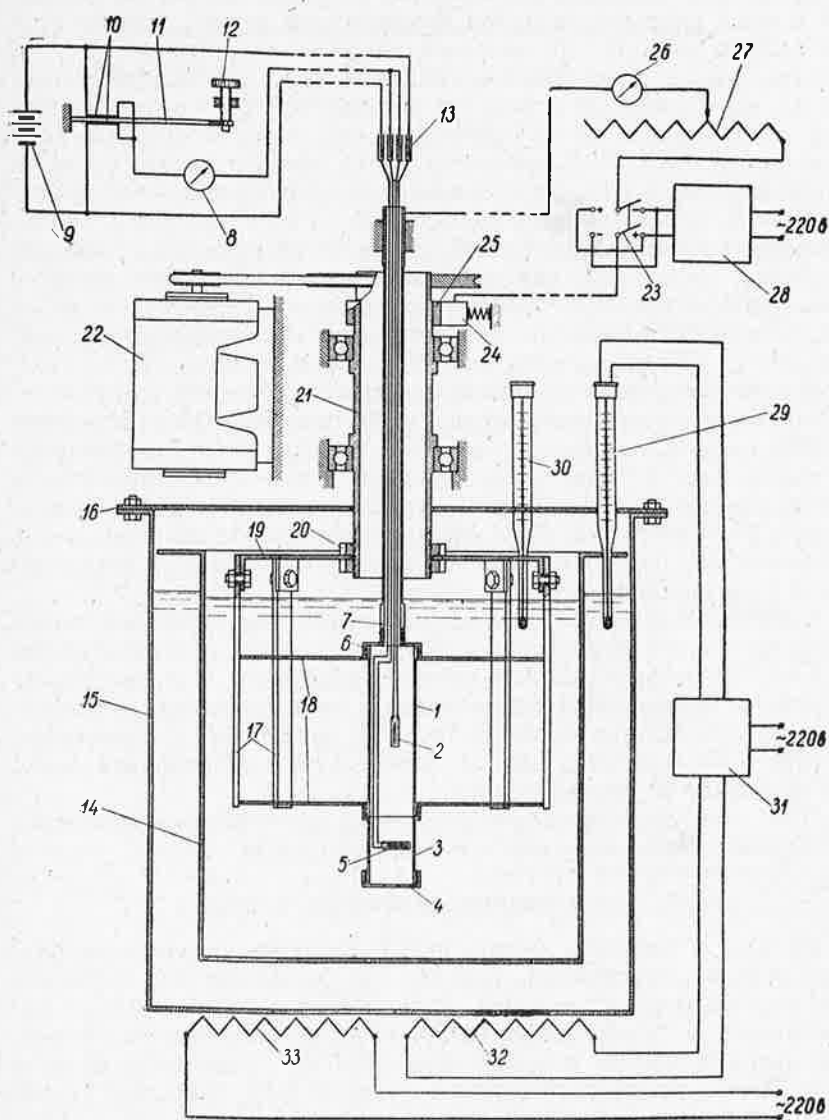


Рис. 3.

Источником питания 9 служил аккумулятор емкостью 60 а·ч.\* Рабочие и компенсационные датчики включались в мост при помощи высококачественного радиотехнического разъема 13.

Ванна железнения 14, сваренная из стальных листов толщиной 3 мм и покрытая изнутри бакелитовым лаком, помещалась в стальном кожухе 15, который закрывался крышкой 16. На крышке ванны в шарикоподшипниках был установлен полый вал 21, через который опускался в ванну контрактметр. У нижнего конца полого вала укреплялся при помощи круглых гаек 20 анодный диск 19. К анодному диску прикреплялись болтами стержневые аноды 17. Для уменьшения загрязнения электролита шламом аноды были помещены в чехлы из стеклянной ткани. Установленные у концов катода диски 18 из гетинакса служили экранами, предупреждавшими концентрацию силовых линий у краев рабочего участка. Для перемешивания электролита полый вал 21 вместе с анодами 17 приводился во вращение электродвигателем 22 посредством круглоременной передачи.

В качестве источника питания ванны постоянным током пользовались селеновым выпрямителем 28 типа ВСГ-3А. Ток подводился к анодам с помощью латунного кольца 25, установленного на полом вала 21 прессовой посадкой, и щеток 24, прижатых к кольцу пружинами. Ток в цепи питания ванны измерялся амперметром 26 типа М-340. Регулирование силы тока производилось реостатом 27. Для переключения катода на анод при декапировании пользовались переключателем 23.

Нагрев электролита в ванне производился через масляную рубашку. Масло в рубашке нагревалось электронагревателями 32 и 33. Нагреватель 33 был включен постоянно. Нагреватель 32 включался и выключался при помощи автоматически действующего устройства, которое состояло из контактного термометра 29 типа ТК-6 и контактора 31. Температура электролита измерялась термометром 30.

Для удаления вредных испарений электролита установка железнения была встроена в вытяжной шкаф.

### 3. Тонкостенные трубчатые катоды

На рис. 4 показаны форма и размеры тонкостенного трубчатого катода. Внутренний диаметр катода выбирался с учетом удобства приклейки датчиков. Толщина стенки выбиралась с таким расчетом, чтобы деформация катода не превышала значений, которые можно измерить при помощи имеющейся аппаратуры. Чтобы получить в средней части катода покрытие равномерной толщины длина рабочего участка катода несколько превы-

\* В статье сохраняется пока еще широко распространенная техническая система единиц, но параллельно с ней для окончательных результатов указаны значения единиц в международной системе.

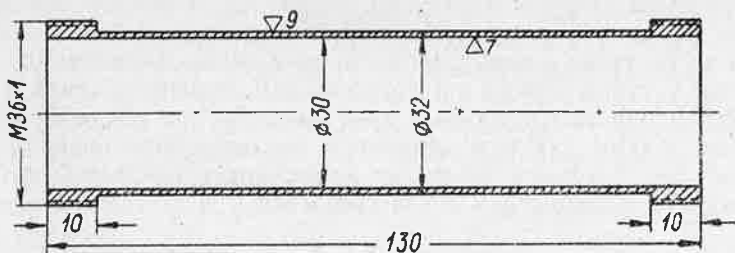


Рис. 4.

шалась по сравнению с наименьшей длиной, которая требуется для исключения краевого эффекта [1].

В качестве металлов для изготовления катодов были выбраны углеродистые качественные стали марок 15 и 45 и техническая медь.

Катоды вытачивались на токарном станке. Наружная поверхность стальных катодов, подлежащая покрытию металлом, шлифовалась.

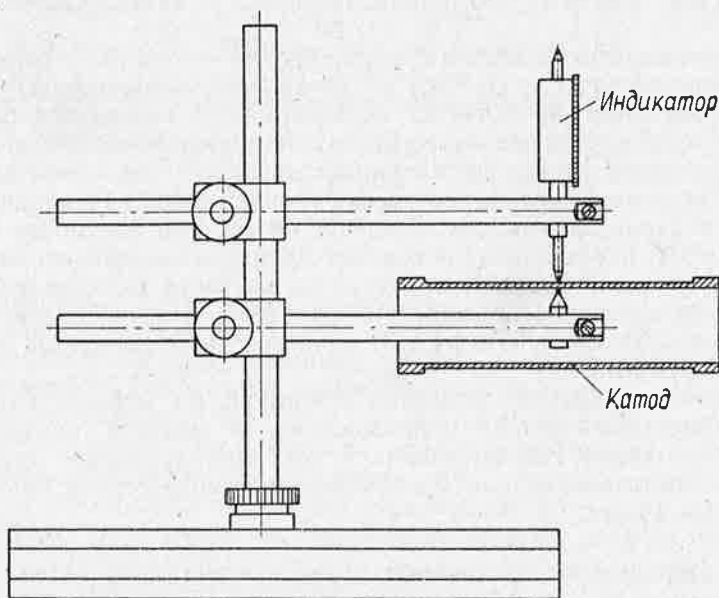


Рис. 5.



До и после наращивания покрытия каждый катод измерялся по толщине стенки индикатором с ценою деления 0,01 мм, который устанавливался на специальном приспособлении (рис. 5). Измерения проводились в трех сечениях по длине катода в четырех точках каждого сечения с последующим осреднением результатов. Толщина покрытия вычислялась как разность толщин катода с покрытием и без покрытия.

#### 4. Электролит и технологический процесс наращивания покрытий

Наращивание покрытий проводилось в электролите следующего состава (в г/л):

Хлористое железо . . . . .	500
Хлористый натрий . . . . .	100
Хлористый марганец . . . . .	5
Свободная соляная кислота . . . . .	0,8...1,0

Приготовление электролита, а также контроль и корректировка его состава проводились способами, рекомендуемыми М. П. Мелковым [3].

Покрытия наращивались толщиной 0,47...0,52 мм при температурах электролита 90, 92,5 и 95°С и при плотностях тока 15 и 20 а/дм<sup>2</sup>. Соотношение площадей анодов и катода составляло 1,5.

Технологический процесс наращивания железных покрытий на стальные катоды состоял из следующих операций: 1) промывка бензином; 2) зачистка мелкозернистой наждачной бумагой; 3) обезжиривание известью; 4) промывка холодной водой; 5) химическое травление в соляной кислоте с удельным весом 1,17 в течение 40 сек; 6) промывка горячей водой; 7) декапирование в ванне железнения в течение 40 сек при плотности тока 10 а/дм<sup>2</sup>; 8) наращивание покрытия; 9) промывка горячей водой; 10) нейтрализация в 10%-ном горячем растворе кальцинированной соды в течение 30 мин; 11) промывка горячей водой; 12) сушка в сушильном шкафу; 13) зачистка мелкозернистой наждачной бумагой.

При наращивании железных покрытий на медные катоды травление (химическое) производилось в азотной кислоте с удельным весом 1,22 в течение 5 сек. Декапирование (также химическое) производилось в 10%-ном растворе серной кислоты в течение 10 сек.

#### 5. Определение постоянных упругости металлов катода и покрытия

Модули упругости металлов катода и покрытия были найдены путем испытания образцов на растяжение и замера про-

дольной деформации при помощи зеркального прибора Мартенса. Коэффициенты Пуассона были найдены косвенным путем. Для этого в результате испытания на кручение с замером угла закручивания при помощи прибора Мартенса определялись модули сдвига металлов катода и покрытия. Имея значения модулей упругости и сдвига, вычисляли коэффициенты Пуассона по известной формуле, устанавливающей связь между постоянными упругости.

В интервале температур 20...100 °С постоянные упругости металлов практически не зависят от температуры. Поэтому определение модулей упругости и сдвига металлов катода и покрытия производилось не при температуре электролита, а при комнатной температуре.

Модули упругости и сдвига металла катода определялись на круглых сплошных образцах с диаметром 8 мм и рабочей длиной 110 мм.

Определение модулей упругости и сдвига металла покрытия производилось на тонкостенных трубчатых образцах (рис. 6), которые изготовлялись следующим образом. Из стальной трубы

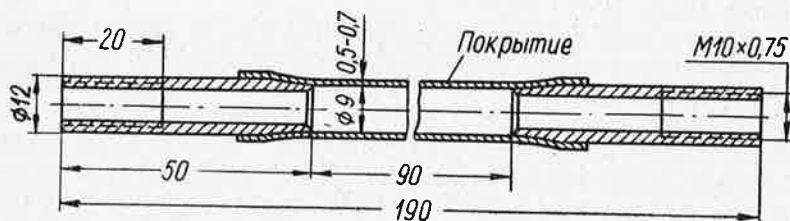


Рис. 6.

вытачивались тонкостенные трубчатые катоды толщиной стенки 0,5 мм, наружная поверхность которых покрывалась слоем электролитической меди толщиной ~0,01 мм. На медное покрытие в средней части катода наращивалось исследуемое железное покрытие толщиной 0,5...0,7 мм. После этого наружная и внутренняя поверхности катода, за исключением среднего участка внутренней поверхности, изолировались парафином. Приготовленные таким образом катоды погружались в соляную кислоту, где травлением удалялся внутренний стальной слой до устойчивого в соляной кислоте медного промежуточного слоя. В результате получились тонкостенные трубчатые образцы с толщиной стенки 0,5...0,7 мм.

Результаты определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона металлов катода приведены в табл. 1.

Таблица 1

Металл	$E_k$		$\mu_k$
	$кг/мм^2$	$н/м^2$	
Сталь 15	$2,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^{11}$	0,3
Сталь 45	$2,1 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,3
Медь	$1,1 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^{11}$	0,3

Для металла покрытия при всех исследованных режимах электролиза получены в пределах точности эксперимента следующие значения постоянных упругости:

$$E_{\text{ц}} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2 \text{ (} 2,0 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2 \text{)}, \mu_{\text{ц}} = 0,3.$$

### 6. Измерение деформации катода

Для измерения деформации катода применялись проволочные датчики базой 20 мм и сопротивлением 193,6...193,8 ом, изготовленные из константановой проволоки на бумажной основе с использованием клея БФ-2. Датчики приклеивались бакелитовым лаком.

Для прижатия датчиков к внутренней стенке катода при наклейке использовалось специальное приспособление [4], схема которого показана на рис. 7. Это приспособление представляет собой алюминиевую трубку 1, которая в средней части имеет несколько мелких отверстий и закрывается с обоих концов алюминиевыми пробками 3. К одной из пробок прикреплен обычный велосипедный вентиль 5. На трубу одет тонкостенный резиновый шланг 2, а воздуонепроницаемость с обоих концов обеспечивается обмоткой из тонкой проволоки 4. После установки датчиков внутри катода в необходимом положении туда же вставлялось описанное приспособление, и резиновый шланг вследствие накачивания в него воздуха прижимался к стенке катода, обеспечивая таким образом равномерное давление на датчики.

Приклеенные датчики подвергались полимеризации под давлением при следующем температурном режиме: 1) выдержка при комнатной температуре в течение 12 ч; 2) нагрев до 100 °С со скоростью 20 °С/ч; 3) выдержка при 100 °С в течение 1,5 ч; 4) нагрев до 120 °С со скоростью 20 °С/ч; 5) выдержка при 120 °С в течение 1,5 ч. После снятия давления была произведена дополнительная полимеризация. Для этого катоды вместе с датчиками нагревались до 150 °С со скоростью 75 °С/ч и выдерживались при этой температуре в течение 3 ч.

Рассмотрим измерительные схемы.

Измерительная схема № 1 (рис. 8) состояла из двух отдельных мостов, питавшихся от аккумулятора А. Одним мостом

измерялась окружная деформация, другим — продольная. Каждое плечо мостов образовалось из двух параллельно включенных датчиков. Сопротивления рабочих датчиков  $R_p$  и компенсационных датчиков  $R_k$  были одинаковые. Датчики  $R_b$  наклеивались с двух сторон на балочку, служащую для балансировки измерительного моста. При таком включении датчиков измерялись средние значения деформации в двух различных точках [5]. Переключение микроамперметра  $M$  производилось радиотехническим переключателем  $P$  с высоким качеством контактов. Для изменения цены деления микроамперметра в схему включалось добавочное сопротивление  $R_d$ .

Результаты, полученные для 8 катодов при помощи измерительной схемы № 1, подтвердили теоретический вывод о том, что окружная и продольная деформации тонкостенного катода практически равны [1]. Поэтому в измерительных схемах № 2 (рис. 9, а) и № 3 (рис. 9, б) все рабочие и компенсационные датчики были включены в плечи одного моста. При этом применялось смешанное соединение датчиков, что позволяло также измерять средние значения деформации катода в четырех точках [5]. Для удобства все четыре рабочих датчика были наклеены в продольном направлении.

Тарировка измерительных схем (определение цены деления микроамперметра в единицах относительной деформации) производилась при помощи консольной тарировочной балочки равного сопротивления (рис. 10). Балочка нагружалась винтом или грузом в точке пересечения боковых сторон и измерялся индикатором прогиб  $f$  на расстоянии  $l$  от заделки. Цена деления  $C$  вычислялась по формуле

$$C = \frac{hf}{l^2N},$$

где  $h$  — толщина балочки;  $N$  — отсчет микроамперметра при прогибе  $f$ .

Для проверки надежности принятой методики измерения деформации были проведены поверочные тарировки измеритель-

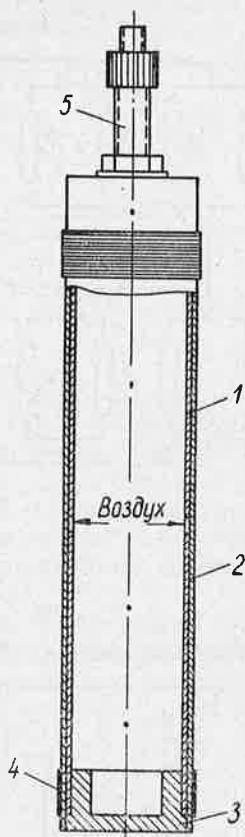


Рис. 7.

Измерительная схема №1

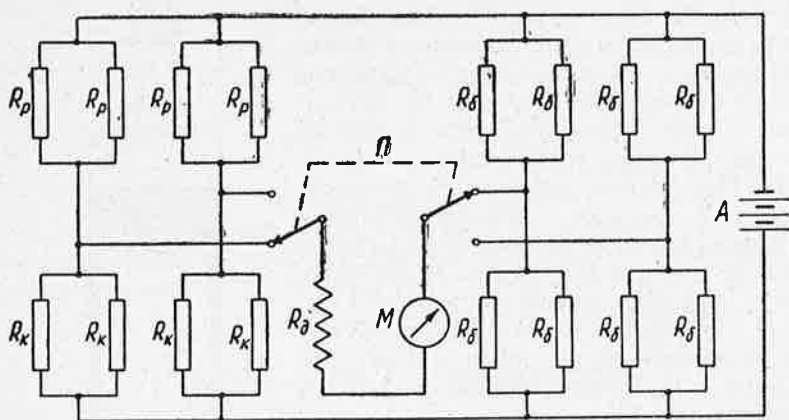


Рис. 8.

Измерительная схема №2

Измерительная схема №3

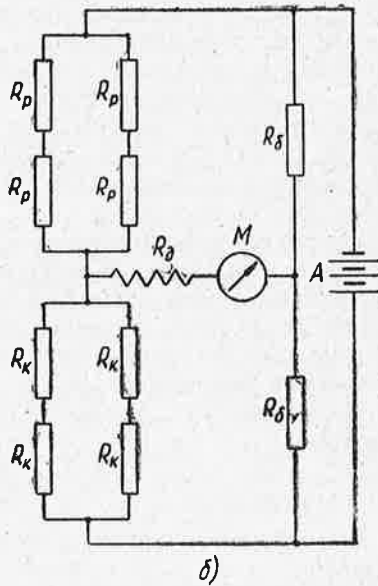
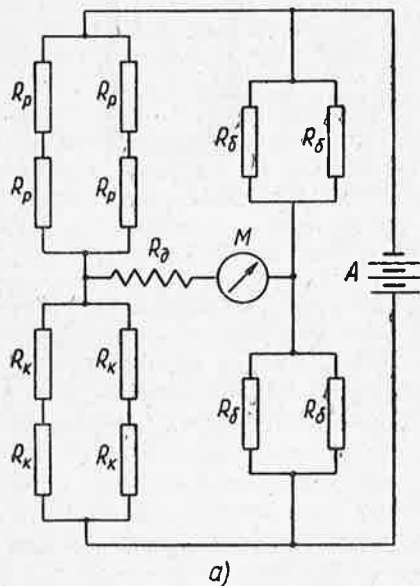


Рис. 9.

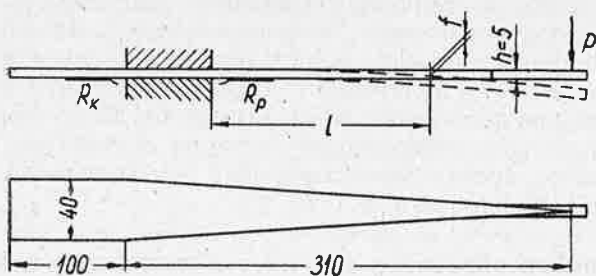


Рис. 10.

ных схем. С этой целью тарировочное приспособление помещалось в соответственно оборудованный сушильный шкаф с устройством для автоматического поддержания заданной температуры. Нагружение тарировочной балочки производилось равными ступенями через равные промежутки времени. Скорость нагружения была выбрана с таким расчетом, чтобы примерно в течение того времени, которое понадобится для наращивания покрытий, использовать всю шкалу микроамперметра.

Результаты двух поверочных тарировок, выполненных соответственно при температурах 22 и 95 °С, представлены на рис. 11, где точками отмечены отсчеты по микроамперметру  $N$ ,

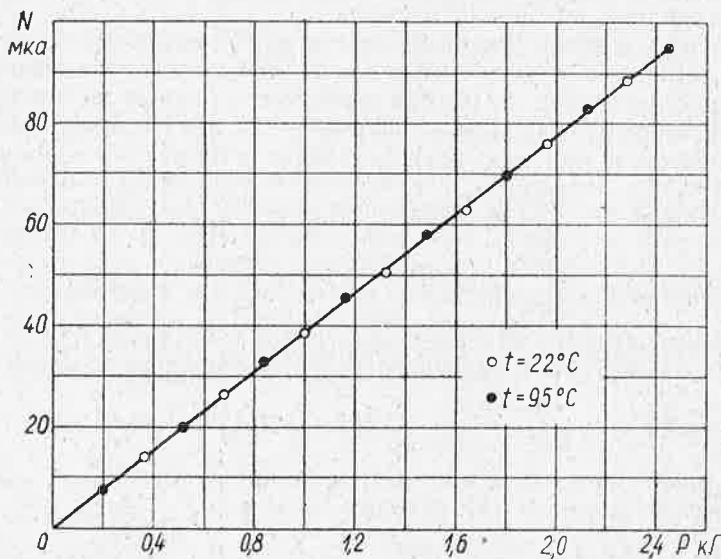


Рис. 11.

соответствующие различным значениям нагрузки  $P$ . Из этого рисунка видно, что отсчеты, полученные при указанных температурах, аппроксимируются практически одной прямой. Это значит, во-первых, что ползучесть датчиков незначительна и, во-вторых, что при изменении температуры от 22 до 95 °С тензочувствительность датчиков практически не изменяется. Учитывая этот результат, производили тарировку измерительных схем при комнатной температуре (18...20 °С).

## 7. Пример обработки данных измерения деформации

В качестве примера рассмотрим обработку результатов измерения деформации одного катода.

Материал катода сталь 15. Толщины катода и покрытия  $h_K = 1,00$  мм,  $h_{\Pi} = 0,52$  мм. Постоянные упругости  $E_K = E_{\Pi} = = 2,0 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\mu_K = \mu_{\Pi} = 0,3$ .

По формуле (2) находим  $\nu = 1$ .

Результатом опыта является ряд отсчетов микроамперметра, соответствующих различным значениям времени наращивания. Путем умножения этих отсчетов на цену деления микроамперметра определялись значения деформации  $\bar{\epsilon}_{ki}$ . Значения безразмерной текущей толщины покрытия  $\zeta_i$ , соответствующие значениям  $\bar{\epsilon}_{ki}$ , определялись по скорости наращивания, которая вычислялась делением окончательной толщины покрытия на время наращивания. Значения деформации  $\bar{\epsilon}_{ki}$  приведены в табл. 2 и представлены на рис. 12 точками.

Для определения параметров  $c$  и  $\sigma_0(0)$  вычислим значения  $\ln(1 + c\zeta_i)$  при  $c = 1$ ,  $c = 1,5$  и  $c = 2$ . Результаты этих вычислений занесены в табл. 2. Разбив имеющиеся данные на две группы (см. табл. 2), находим по формуле (7) значения функции  $\omega$  при искомом и при заданных значениях параметра  $c$ . Получим

$$\begin{aligned} \omega(c) &= \frac{3748}{1527} = 2,454, & \omega(1) &= \frac{4,027}{1,555} = 2,590, \\ \omega(1,5) &= \frac{5,622}{2,247} = 2,502, & \omega(2) &= \frac{7,024}{2,893} = 2,428. \end{aligned}$$

Как видим, искомое значение параметра  $c$  лежит между значениями 1,5 и 2. Путем линейного интерполирования находим

$$c = 1,5 + \frac{2 - 1,5}{2,502 - 2,428} (2,502 - 2,454) = 1,82 \approx 1,8.$$

Более точно определить параметр  $c$  не требуется.

Согласно формуле (8) находим

$$\sigma_0(0) = 1,8 \frac{2,0 \cdot 10^4}{1 - 0,3} \cdot \frac{5275 \cdot 10^{-6}}{9,123} = 29,7 \text{ кг/мм}^2 \quad (29,1 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2).$$

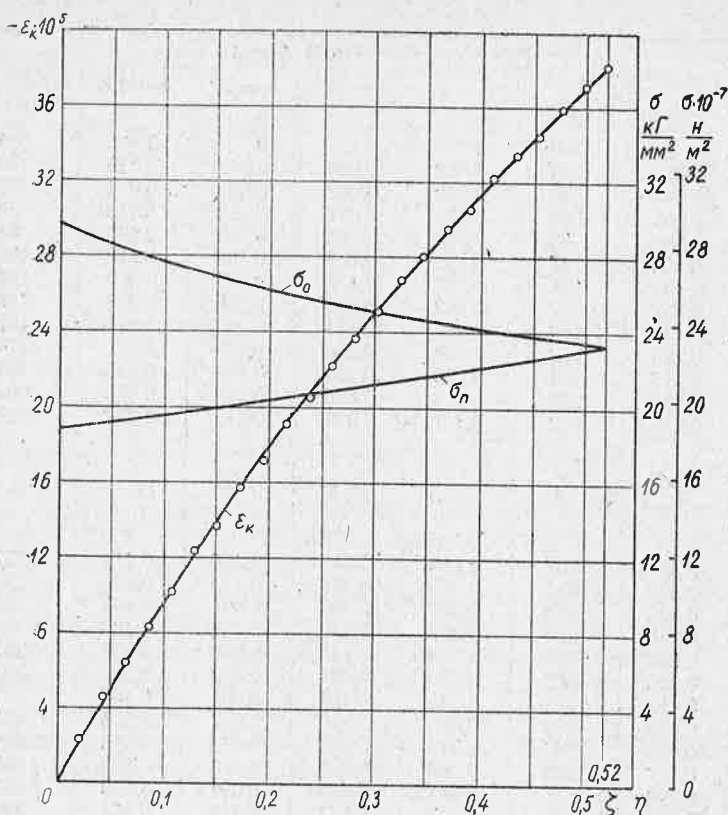


Рис. 12.

Значения  $\varepsilon_{ki}$  аппроксимирующей функции (5), вычисленные при найденных параметрах, приведены в табл. 2. График, построенный по этим значениям, показан на рис. 12. Там же показаны график изменения напряжения  $\sigma_0$  в процессе наращивания, построенный по формуле (1), и эпюра собственных напряжений в покрытии, построенная по равенству (3).

Для собственных напряжений в катоду по формуле (4) находим  $\sigma_k = -10,9 \text{ кг/мм}^2$  ( $-10,7 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$ ).



Таблица 2

i	$\xi_i$	$-\varepsilon_{\text{ки}} \cdot 10^6$	$\ln(1 + c\xi_i)$				$-\varepsilon_{\text{ки}} \cdot 10^6$
			c = 1	c = 1,5	c = 2	c = 1,8	
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,022	23	0,022	0,033	0,043	0,039	23
3	0,043	46	0,042	0,062	0,083	0,074	43
4	0,065	64	0,063	0,094	0,122	0,110	64
5	0,087	83	0,084	0,122	0,160	0,146	84
6	0,108	102	0,102	0,150	0,195	0,178	103
7	0,130	124	0,122	0,178	0,231	0,210	121
8	0,152	137	0,142	0,205	0,265	0,242	140
9	0,173	158	0,160	0,231	0,297	0,271	157
10	0,195	172	0,178	0,256	0,329	0,301	174
11	0,217	191	0,196	0,282	0,360	0,330	191
12	0,238	205	0,213	0,305	0,389	0,356	206
13	0,260	222	0,231	0,329	0,419	0,384	222
13 $\sum_{i=1}$	—	1527	1,555	2,247	2,893	—	—
14	0,282	237	0,248	0,353	0,447	0,411	237
15	0,303	251	0,265	0,374	0,474	0,435	251
16	0,325	268	0,281	0,398	0,501	0,461	266
17	0,347	280	0,298	0,419	0,527	0,485	280
18	0,368	295	0,313	0,440	0,552	0,508	293
19	0,390	305	0,329	0,461	0,577	0,532	307
20	0,412	322	0,345	0,481	0,601	0,555	321
21	0,433	334	0,360	0,501	0,624	0,576	333
22	0,455	344	0,375	0,520	0,647	0,598	345
23	0,477	359	0,390	0,540	0,670	0,620	358
24	0,498	371	0,404	0,558	0,691	0,640	370
25	0,520	382	0,419	0,577	0,713	0,661	382
25 $\sum_{i=14}$	—	3748	4,027	5,622	7,024	—	—
25 $\sum_{i=1}$	—	5275	5,582	7,869	9,917	9,123	—

### 8. Результаты определения параметров $c$ и $\sigma_0(0)$

Для получения достоверных значений параметров  $c$  и  $\sigma_0(0)$  было при каждом режиме электролиза проведено по два опыта. Обработку полученных данных проводили описанным выше способом.

Анализ результатов определения параметра  $c$  показал, что в пределах точности эксперимента можно для всех исследованных режимов принимать  $c = 1,8$ .

Таблица 3

Металл катода	$t$ °C	$D_k$ $a/\partial m^2$	$\sigma_0(0)$	
			$кГ/мм^2$	$н/м^2$
Сталь 15	90	15	27	$26 \cdot 10^7$
То же	90	20	31	$30 \cdot 10^7$
"	92,5	20	30	$29 \cdot 10^7$
"	95	20	10	$10 \cdot 10^7$
Сталь 45	90	15	29	$28 \cdot 10^7$
То же	90	20	34	$33 \cdot 10^7$
"	92,5	20	27	$26 \cdot 10^7$
"	95	20	11	$11 \cdot 10^7$
Медь	90	15	28	$27 \cdot 10^7$
То же	90	20	33	$32 \cdot 10^7$
"	92,5	20	27	$26 \cdot 10^7$
"	95	20	11	$11 \cdot 10^7$

В табл. 3 приведены значения параметра  $\sigma_0(0)$ , вычисленные при  $c = 1,8$ . Из этой таблицы видно, что параметр  $\sigma_0(0)$  почти не зависит от природы металла катода. Это объясняется, по-видимому, тем, что влияние природы металла катода на величину собственных напряжений является существенным только при наращивании покрытий малой ( $\leq 0,005$  мм) толщины [6].

Параметр  $\sigma_0(0)$ , как следует из табл. 3, изменяется в зависимости от режимов электролиза. С повышением температуры электролита параметр  $\sigma_0(0)$  уменьшается, а с повышением катодной плотности тока увеличивается.

### Выводы

1. Метод деформации тонкостенного трубчатого катода позволяет получить надежные результаты.

2. Параметр  $c$ , определяющий характер изменения собственных напряжений по толщине покрытия, может быть принят для исследованных железных покрытий равным 1,8. Это значит, что напряжение в пограничном слое с увеличением текущей толщины покрытия монотонно убывает.

3. Параметр  $\sigma_0(0)$  (напряжение в пограничном слое покрытия в начальный момент наращивания) зависит от режимов электролиза. С повышением катодной плотности тока и с понижением температуры электролиза параметр  $\sigma_0(0)$  увеличивается. Для исследованных железных покрытий значение параметра  $\sigma_0(0)$  изменяется от  $10$   $кГ/мм^2$  ( $10 \cdot 10^7$   $н/м^2$ ) до  $34$   $кГ/мм^2$  ( $33 \cdot 10^7$   $н/м^2$ ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кыо Я. П. Определение собственных напряжений в гальванических покрытиях по деформации тонкостенного трубчатого катода. Сборник научных трудов Эстонской сельскохозяйственной академии, 1963, № 31.
2. Мелентьев П. В. Приближенные вычисления. М., Физматгиз, 1962.
3. Мелков М. П. Восстановление автотракторных деталей электролитическим оставливанием. М., Автотрансиздат, 1957.
4. Бюлер Г. Полное определение поля остаточных напряжений в сплошных и полых металлических цилиндрах. Сб. переводов «Остаточные напряжения». М., Изд. иностранной литературы, 1957.
5. Применение тензометрии в машиностроении. Сб. под ред. П. З. Петухова и А. В. Казанцева. М.-Свердловск, Машгиз, 1956.
6. Ваграмян А. Т., Петрова Ю. С. Физико-механические свойства электролитических осадков. М., Изд. АН СССР, 1960.

## OMAPINGETE UURIMINE GALVAANILISTES RAUDKATETES ÕHUKESSEINALISE TORUKATOODI DEFORMATSIOONIMEETODIGA

Tehnikakandidaat J. Kõo

EPA ehitusmehaanika kateedri dotsendi kt.

Kokkuvõte

Õhukeseseinalise torukatoodi deformatsioonimeetodiga uuriti omapingeid kulunud masinaelementide taastamiseks kasutatavates galvaanilistes raudkatetes. Artiklis esitatakse nende uurimiste meetodika ja tulemused.

## UNTERSUCHUNG VON EIGENSPANNUNGEN IN GALVANISCHEN EISENÜBERZÜGEN NACH DEM FORMÄNDERUNGSVERFAHREN DER DÜNNWANDIGEN ROHRKATHODE

Kandidat der technischen Wissenschaften J. Kõo

Dozent-Stellvertreter am Lehrstuhl der Baumechanik der Estnischen  
Landwirtschaftlichen Akademie

Zusammenfassung

Bei der Untersuchung von Eigenspannungen in galvanischen Eisenüberzügen zwecks Wiederherstellung der verschlissenen Maschinenelemente wurde das Formänderungsverfahren der dünnwandigen Rohrkathode verwendet. Der Beitrag erläutert die Methodik und Ergebnisse dieser Untersuchungen.