

А.С. Гонтарь, М.Л. Таубин, Е.Е. Коноплев

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСА АНОДОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

Аннотация

Рассчитаны величины долговечности анодов рентгеновской трубки (предельное количество экспозиций до образования трещин в покрытии или подложке) в режимах эксплуатации. В расчетах на основании уравнения усталости Мэнсона учитывались исходные пластические свойства поли- и монокристаллических материалов.

Показано, что предельное количество экспозиций до образования трещин в монокристаллическом покрытии составляет в зависимости от режима 80000...250000 включений, что в 30...100 раз больше, чем в поликристаллическом покрытии и в 4...5 раз больше, чем в аноде с поликристаллическим W-Re-покрытием.

Экспериментально показано, что значение мощности дозы для монокристаллического анода практически не меняется в течение ~ 5000 включений, а для поликристаллических анодов после ~ 1000 включений наблюдается снижение мощности дозы рентгеновского излучения. Это свидетельствует о большей повреждаемости поликристаллов по сравнению с монокристаллами, что подтверждает приведенные расчетные данные.

Прогресс современной рентгеновской техники во многом обусловлен возможностью повышения эксплуатационных характеристик рентгеновских трубок. Наряду с необходимостью увеличения интенсивности излучения и уменьшения размеров фокусного пятна, важное значение имеет увеличение ресурса работы рентгеновской трубки, работающей при повышенных термомеханических нагрузках.

При вращении анода электронной бомбардировке последовательно подвергаются различные участки его фокусной дорожки. Теплота, выделяющаяся в фокусном пятне, распространяется по всему телу анода и излучается с его поверхности. В моменты прохождения фокусного пятна под электронным пучком локальная температура резко возрастает, а затем плавно снижается. Так продолжается в течение всей экспозиции, а за время паузы до следующей экспозиции имеет место снижение средней температуры анода. При следующей экспозиции процесс нагрева повторяется с достижением более высокого уровня средней температуры. Обычно через 5...10 циклов изменение температуры принимает установившийся характер, т. е. характер изменения температуры при данной экспозиции будет повторять характер изменения температуры в предыдущей экспозиции.

Характер первого циклического изменения температуры определяется вращением анода – временем прохождения электронным лучом фокусного пятна (временем одного оборота). Характер второго определяется режимом работы рентгеновской трубки – длительностью экспозиции и длительностью паузы.

Таблица 1

Характерные режимы эксплуатации анодов в рентгеновской трубке 20-40БД40-125

№ п/п	Длительность экспозиции, с	Длительность паузы, с	Напряжение трубки, кВ	Ток трубки, мА
1	0,1	18	125	320
2	1,0	96	125	188
3	10,0	300	125	56

Режимы работы рентгеновской трубки общей диагностики (20-40БД40-125), разработанной ЗАО «Светлана-Рентген» (г. Санкт-Петербург), приведены в табл. 1.

Анод указанной РТ характеризуется следующими геометрическими размерами: диаметр анода – 70 мм, толщина подложки – 12 мм, толщина мишени – 1 мм, угол наклона рабочей поверхности – 17°. Радиус средней линии фокусной дорожки – 27,5 мм. Частота вращения анода – 50 об/с, эффективное фокусное пятно – 2 × 2 мм. Материал подложки – молибден, материал мишени – вольфрам. Заданный ресурс работы РТ – 20000 экспозиций по любому из режимов.

Для определения ресурса анодов для РТ этого класса проведены расчеты температурных полей, напряженно-деформированного состояния и количества термоциклов до появления трещин на фокусной дорожке анодов из поли- и монокристаллических W и Mo.

Особенности расчета температурных полей и напряженно-деформированного состояния вращающихся анодов РТ

Заметное превышение температуры над средней температурой фокусной дорожки наблюдается лишь в непосредственной близости от фокусного пятна. Это позволяет при определении величины амплитуды колебаний температуры не учитывать размеры анода. Сказанное справедливо для скоростей вращения анода, удовлетворяющих условию $n > 0,17 \cdot a \cdot d \cdot (r_0 h^2)$ [1], где a – температуропроводность вольфрама; h – толщина покрытия. Для скорости 50 об/с, $h > 0,3$ мм, $a < 0,3$ см²/с, приведенное условие выполняется.

Таким образом, температурную задачу можно разделить на две задачи.

Первая задача – это задача об импульсно-периодическом осесимметричном нагреве биметаллического анода. Область нагрева совпадает с фокусной дорожкой. Тепловой поток равен тепловой мощности, отнесенной к единице площади фокусной дорожки. Длительность импульса соответствует времени экспозиции. Период равен сумме длительности экспозиции и длительности паузы. Граничное условие – излучение тепла с поверхности анода.

Вторая задача – плоская, двумерная задача о нагреве полупространства локальным источником тепла, движущимся по его границе со скоростью, равной скорости перемещения фокусного пятна по фокусной дорожке. Ширина пятна нагрева равна ширине фокусного пятна. Полупространство имеет начальную температуру T_{cp} , определяемую при решении первой задачи. Вторая задача может быть решена как численно, так и аналитически.

Решение первой задачи дает представление о характере циклического изменения средней температуры фокусной дорожки и ее величине, а решение второй определяет величину амплитуды в момент прохождения фокусного пятна.

Температурное поле анода в трехмерной нестационарной постановке рассчитывалось с помощью уравнения теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T),$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала катода; ρ – плотность; c – теплоемкость; T – абсолютная температура; t – время.

Граничным условием для первой задачи являются величины плотности потоков теплового излучения

$$q_{i,j} = \varepsilon_{i,j} \sigma (T_i^4 - T_j^4),$$

где $\varepsilon_{i,j}$ – приведенные степени черноты в системе анод-элементы рентгеновской трубки; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T_i – средняя температура

i -го элемента анода; T_j – средняя температура j -го элемента рентгеновской трубки.

Задачи определения температурных полей и напряженно-деформированного состояния анода (в упруго-пластической постановке) решались методом конечных элементов с учетом температурной зависимости теплофизических и прочностных свойств используемых материалов.

Циклически повторяющееся напряженно-деформированное состояние анода приводит к непрерывному накоплению повреждений в материале анода. Соответствующая кривая усталости Мэнсона аппроксимируется степенной зависимостью [2], [3]

$$\varepsilon = \frac{K}{E} N^{-n} + MN^{-p},$$

где ε – деформация; K, M, n, p – постоянные, зависящие от материала анода; N – количество циклов.

Известно, что при эксплуатации анодов интенсивность рентгеновского излучения со временем падает. Предельным считается ее падение на 30%. В этот момент на рабочей поверхности фокусной дорожки наблюдается развитая сеть трещин глубиной до 100 мкм [1].

Критерий, основанный на деформационно-кинетических представлениях о характере накопления повреждений [4], связывает наступление предельного состояния с суммарным накоплением усталостных повреждений:

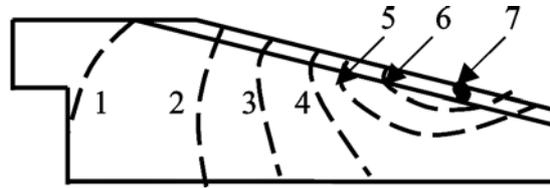


Рис. 1. Распределение температур в поликристаллическом (1 – 1250 °С; 2 – 1304 °С; 3 – 1358 °С; 4 – 1413 °С; 5 – 1467 °С; 6 – 1522 °С) и монокристаллическом (1 – 1263 °С; 2 – 1311 °С; 3 – 1358 °С; 4 – 1406 °С; 5 – 1454 °С; 6 – 1501 °С) анодах

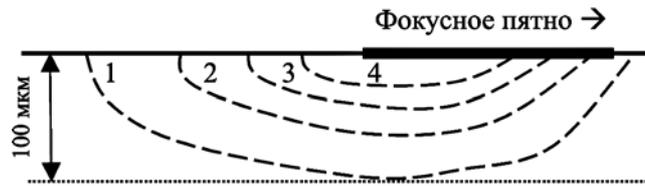


Рис. 2. Распределение температуры в области фокусного пятна для поликристаллической вольфрамовой мишени: 1 – 1653 °С; 2 – 1693 °С; 3 – 1723 °С; 4 – 1773 °С

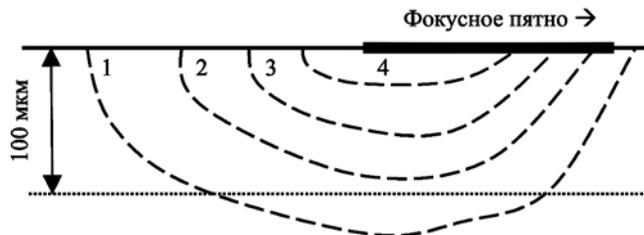


Рис. 3. Распределение температуры в области фокусного пятна для монокристаллической вольфрамовой мишени: 1 – 1628 °С; 2 – 1668 °С; 3 – 1698 °С; 4 – 1748 °С

$$\int_1^{N_f} \frac{dN}{N_i} = 1,$$

где N_f – количество циклов до предельного состояния; N_i – возможное предельное количество циклов для каждого из осуществляемых типов нагружений в предположении, что действует только он один. Поскольку, как было показано выше, область фокусной дорожки анода подвержена двойному циклическому деформированию, этот критерий можно представить в виде

$$\int_1^{N_f} \frac{dN}{N_C} + k \int_1^{N_f} \frac{dN}{N_{TM}} = 1,$$

где N_f – предельное количество экспозиций, или долговечность анода рентгеновской трубки; N_C – количество термоциклов до появления трещин от колебаний средней температуры; N_{ϕ} – количество термоциклов до появления трещин от колебания локальных температур; k – количество оборотов за время экспозиций ($k = n \cdot \tau_{\Sigma}$).

В рассматриваемом нами случае упрочнение материала мишени при термоциклировании не учитывается, поэтому при циклическом деформировании уже спустя малое число циклов для накопленной деформации можно использовать формулу

$$e_i^{(накопл.)} = N \cdot \Delta e_i,$$

где N – количество циклов (термонагружения); Δe_i – накопленная деформация за один цикл (дефект деформационной петли).

Результаты тепловых и прочностных расчетов

На рис. 1-3 представлены температурные поля в объеме анода и в области фокусного пятна поли-

монокристаллических анодов для 3-го режима эксплуатации РТ (табл. 1).

Использование в качестве материалов анода РТ монокристаллических молибдена и вольфрама приводит к снижению уровня температур на 50...150 °С.

Пластические деформации этих анодов достигают максимальных значений на поверхности фокусного пятна. Интенсивность пластической деформации в монокристаллах выше, чем в поликристаллах, из-за более низкого предела текучести, однако монокристалл по мере накопления необратимой деформации превращается в ячеистую структуру с различными углами разориентации между блоками [5]. По мере накопления необратимой деформации в границах ячеек возрастает плотность дислокаций и тем самым увеличивается разориентация соседних блоков. При этом внутренняя область ячеек достаточно совершенна, т. е. характеризуется низкой плотностью дислокаций. Кроме того, деформированный монокристалл имеет повышенные механические свойства из-за малого размера ячеек (увеличивается предел текучести).

На рис. 4 представлено изменение структуры монокристалла вольфрама до образования трещин в зоне фокусной дорожки при эксплуатации анода.

Расчетно-экспериментальные исследования авторов показали, что при циклическом тепловом нагружении анода накопление пластической деформации с образованием разориентированных ячеек в пределах кристаллических блоков в зоне фокусной дорожки при рассмотренном режиме работы происходит в течение примерно 10^4 циклов нагружения, в то время как общее число циклов за ресурс составляет $10^5...10^6$ [5].

Таким образом, поведение монокристаллического материала в зоне фокусной дорожки в течение лишь примерно 10 % ресурса определяется ис-

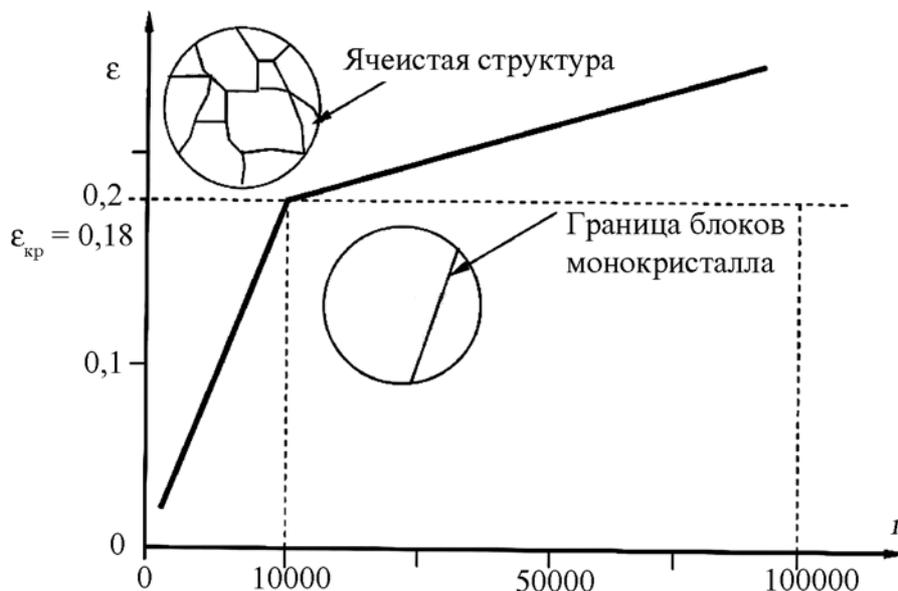


Рис. 4. Изменение структуры монокристалла вольфрама до образования трещин в зоне фокусной дорожки анода

ходными свойствами, а далее формируется структура, в большей мере отвечающая цели достижения длительного ресурса (высокая прочность в сочетании с характерной для монокристаллических материалов высокой пластичностью). Для этих условий допустимо выбирать исходный монокристаллический материал с разориентацией блоков в пределах $5...20^\circ$ [5]. Наличие блочной структуры с такой угловой разориентацией не оказывает влияния на формирование ячеистой структуры в процессе эксплуатации анода.

Выбор углов разориентации кристаллических блоков в диапазоне $5...20^\circ$ является предпочтительным, так как в области, непосредственно примы-

кающей к фокусной дорожке и сохраняющейся в неперестроенном состоянии, выбранный материал имеет более низкое значение предела текучести, что уменьшает пластические деформации поверхности фокусной дорожки.

Определяющей характеристикой материала при анализе накопления необратимой пластической деформации считается предел текучести. Эта характеристика зависит от скорости деформации $\dot{\epsilon}^*$ и при $\dot{\epsilon}^* > 10^2 \text{ c}^{-1}$ (реализуемой для исследуемых режимов эксплуатации анода РТ) существенно возрастает. Определение динамического предела текучести при высокой температуре в условиях неравномерного нагрева позволит получить более обоснованные

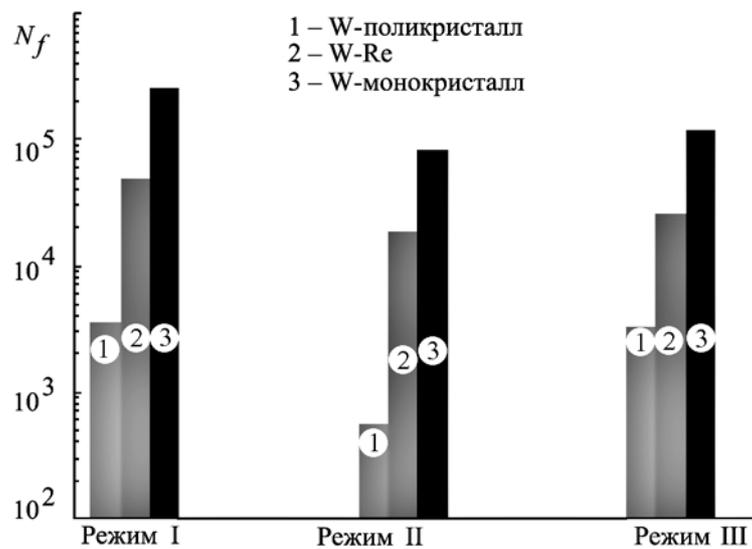


Рис. 5. Долговечность биметаллических анодов по критерию растрескивания фокусной дорожки для трех режимов эксплуатации РТ

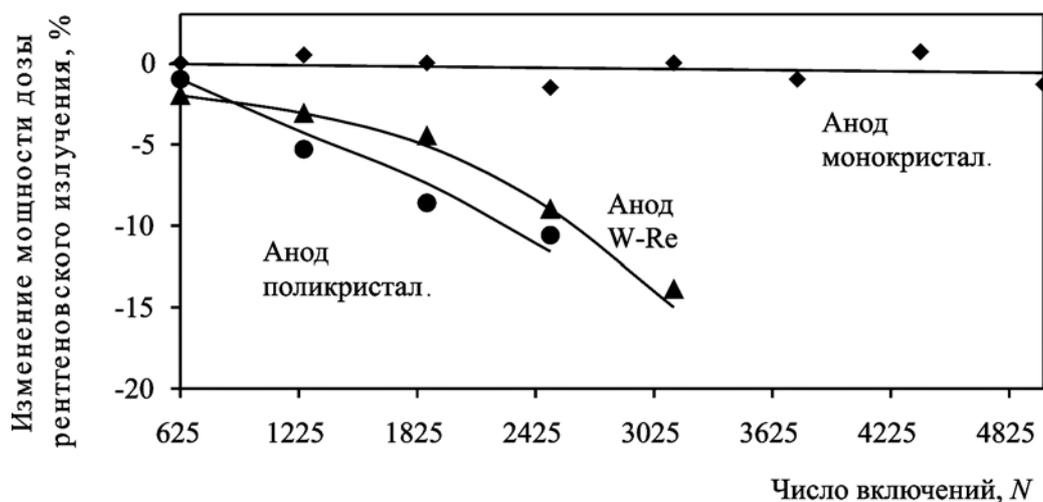


Рис. 6. Изменение мощности дозы рентгеновского излучения от количества включений при испытании опытных образцов анодов

количественные закономерности изменения структуры монокристаллического анода. Авторы предложили способ определения динамического предела текучести в этих условиях [6].

Таким образом, описанная структура мишени, которая формируется в процессе работы РТ, обладает оптимальными прочностными свойствами (прочная мишень на мягкой подложке), что обуславливает малое искажение рабочей поверхности мишени и снижает накопление необратимых пластических деформаций за счет усталости материала.

Результаты расчетов долговечности анодов

На рис. 5 представлены диаграммы расчетных величин долговечности анодов рентгеновской трубки в исследуемых режимах ее эксплуатации, рассчитанных для исходных пластических свойств поли- и монокристаллических материалов (без учета увеличения предела текучести монокристаллов за счет изменения структуры и динамического характера нагрузок).

Как следует из рис. 5, для всех исследованных режимов работы рентгеновской трубки использование монокристаллических молибдена и вольфрама приводит к значительному увеличению долговечности анода.

Долговечность анода (предельное количество экспозиций до образования трещин в покрытии или подложке) рассчитывалась на основании уравнения усталости Мэнсона с использованием деформационно-кинетического критерия циклической прочности.

Показано, что использование монокристаллических молибдена и вольфрама приводит к значительному повышению долговечности анодов.

Предельное количество экспозиций до образования трещин в монокристаллическом покрытии составляет в зависимости от режима 80000...250000, что в 30...100 раз больше, чем в поликристаллическом покрытии и в 4...5 раз больше, чем в аноде с поликристаллическим W-Re покрытием.

Для определения эксплуатационных характеристик анодов из различных материалов проводились их испытания в составе мощных РТ [7], [8]. На рис. 6 показано изменение мощности дозы рентгеновского излучения от количества включений при испытаниях опытных образцов анодов [аноды WRe-поликристаллические и монокристаллические испытывались при мощности, вкладываемой в анод, 50 кВт, анод (поликристалл) – 40 кВт].

Из представленной зависимости видно, что значение мощности дозы для монокристаллического анода практически не меняется в течение ~ 5000 включений, а для поликристаллических анодов после ~ 1000 включений наблюдается снижение мощности дозы рентгеновского излучения.

Это свидетельствует о большей повреждаемости поликристаллов по сравнению с монокристал-

лами, что подтверждает приведенные в данной статье расчетные данные.

Выводы

1. Расчетное исследование на основании уравнения усталости Мэнсона по деформационно-кинетическому критерию циклической прочности показало, что использование монокристаллических Mo и W вместо поликристаллических приводит к значительному повышению долговечности анодов.

2. Экспериментальное исследование характеристик анодов из различных материалов в рентгеновской трубке 20-40БД40-125 показало, что значение мощности дозы для монокристаллического W-анода практически не меняется в течение ~ 5000 включений, а для поликристаллических WRe-анодов после ~ 1000 включений наблюдается заметное снижение мощности дозы рентгеновского излучения.

Список литературы:

1. Денискин Ю.Д., Чижунцова Ю.А. Медицинские рентгеновские трубки и излучатели. – М.: Энергоиздат, 1984.
2. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. – М.: Машиностроение, 1974.
3. Шнейдерович Р.М. Прочность при статистическом и повторно-статистическом нагружении. – М.: Машиностроение, 1968.
4. Гусенков А.П., Москвитин Г.В., Хорошилов В.Н. Малоцикловая прочность оболочечных конструкций. – М.: Наука, 1989.
5. Николаев Ю.В., Гонтарь А.С., Власов Н.М., Коноплев Е.Е. Анод рентгеновской трубки / Патент на изобретение № 2172450. 2001.
6. Гонтарь А.С., Костин В.М., Власов Н.М., Смирнов Л.Г., Коноплев Е.Е. Способ определения динамического предела текучести / Патент на изобретение № 2185610. 2000.
7. Таубин М.Л., Ясколко А.А. Повышение эксплуатационных характеристик рентгеновских трубок медицинского назначения // Медицинская техника. 2010. № 2 (260). С. 39-42.
8. Таубин М.Л., Степанов Г.Е., Афанасьев Н.Г., Костин В.М., Соколов В.А. Определение эксплуатационных характеристик монокристаллических анодов при испытаниях в составе мощных рентгеновских трубок / В кн.: Сб. трудов НИИ НПО «ЛУЧ» 2000-2002. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2003.

Александр Степанович Гонтарь,
д-р техн. наук, начальник отдела,
Михаил Львович Таубин,
д-р техн. наук, гл. научный сотрудник,
Евгений Егорович Коноплев,
ст. научный сотрудник,
ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»,
г. Подольск, Московская обл.,
e-mail: npo@sialuch.ru