

Э. С. ОСТЕРНИК, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ГП завод
Электротяжмаш, Харьков

О ПАРАМЕТРАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПРОВОДНИКОВОЙ МЕДИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ЖИДКОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Виконано аналіз технологічних процесів, статистики механічних характеристик та структури роторних провідників для турбогенераторів. Це дозволяє дати оцінку надійності за допомогою кумулятивної моделі відмов.

Ключові слова: роторні провідники, механічні характеристики, надійність, статистика, турбогенератор.

Выполнен анализ технологических процессов, статистики механических характеристик и структуры роторных проводников для турбогенераторов. Это позволяет дать оценку надежности с помощью кумулятивной модели отказов.

Ключевые слова: роторные проводники, механические характеристики, надежность, статистика, турбогенератор.

We are accomplished the analysis of processing technology, structure and statistics of mechanical characteristics of rotor conductors for turbogenerators. These data permit let the reliability estimation by means of cumulative failure model.

Keywords: rotor conductors, mechanical characteristics, reliability, statistics, turbogenerator.

Введение, цель и постановка задачи. Известно, что надежную работу турбогенераторов можно обеспечить лишь при условии проведения теоретических и экспериментальных исследований обмоток ротора и статора. Аварии крупных синхронных генераторов показали, что требуются инженерные расчетные схемы и эксперименты на обмотках, их моделях и отдельных элементах [1]. Предыдущие работы данного цикла относились к статорной обмотке.

В этой работе рассматривается обмотка ротора. Комплекс вопросов механики, конструкции и технологии роторной обмотки оказался весьма сложным, и здесь описаны, в основном, состояние и постановка задачи, некоторые пути ее решения и полученные результаты.

При эксплуатации турбогенераторов мощностью 500 МВт с жидкостным охлаждением возникла необходимость в повышении надежности роторной обмотки. Ее проводники выполняются из квадратных или прямоугольных труб с центральным круглым отверстием для охлаждающей дистиллированной воды или масла. Трубы выполняются из меди с присадкой серебра. Медь обладает кубической гранецентрированной кристаллической решеткой с параметром $3,608 \cdot 10^{-4}$ мкм. Ее монокристаллы характерны значительной

упругой анизотропией. Известно, что серебро полностью растворяется в меди в твердом состоянии; оно обладает аналогичной решеткой с параметром $4,077 \cdot 10^{-4}$ мкм.

При холодном волочении или прокатке зерна меди дробятся на мелкие участки. При больших обжатиях образуется предпочтительная ориентация таких осколков. При этом временное сопротивление σ_B и твердость H меди повышаются, относительное удлинение после разрыва δ снижается. После рекристаллизационного отжига при 500...600 °С создается мелкозернистая равноосная структура, восстанавливаются пластические свойства меди [2].

Для мощных турбогенераторов механическая прочность чисто медных обмоток оказалась недостаточной [3]. Уже при подъеме частоты вращения холодного ротора до 2000 об/мин роторные проводники полностью защемляются под действием центробежных сил от ряда проводников, расположенных в тех же пазах ротора, но ближе к его оси [4]. Максимальные напряжения развиваются в торцах ротора. С учетом принятых допущений напряжения сжатия в опасном сечении проводника определяются по формуле

$$\sigma^{(-)} = \frac{k_1(1 - d_c^2 k_2) - d_c k_3}{a - d_c},$$

где a – ширина, d_c – диаметр отверстия в проводнике, k_1, k_2, k_3 – константы, определяемые данными ротора.

При нагреве обмотки током до рабочей температуры в витках появляются температурные напряжения сжатия, особенно у дна паза. Если они превышают предел текучести, то после снятия нагрузки с генератора в соответствующей зоне обмотки возникают остаточные деформации. Процесс повторяется при каждом цикле пуск-нагрев-снятие нагрузки (особенно при остановках). Остаточные деформации сжатия суммируются, и укорочение может привести к замыканию витков обмотки ротора, что повышает вибрацию турбоагрегата. Возможно и разрушение материала обмотки.

Ввиду этого в мощных турбогенераторах применяют обмотку из меди, легированной серебром. Сравнительные данные приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1 – Некоторые характеристики медных сплавов для роторных обмоток

Состав сплава	σ_T , МПа	δ , %	ρ , Ом · мм ² /м
Без присадки серебра	60...80	35...40	0,0175
С присадкой серебра	170	35	0,0182

Примечание: σ_T – предел текучести, ρ – электрическое сопротивление. Отметим, что реальнее было бы сопоставление не по σ_T , а по условному предел текучести $\sigma_{0,2}$ – см. далее.

Некоторые фирмы для экономии применяют медь, легированную кадмием Cd. Он кристаллизуется в гексагональной системе, температура плавления $t_m^0 = 321$ °С. При внесении 0,8...1 % Cd значение σ_B возрастает почти

второе, $\rho \approx 90 \% \rho_{Cu}$ [2].

Целью работы является изучение вопросов, прямо или через технологию связанных с прочностью обмоток. Сюда относится статистический анализ сдаточных механических характеристик и их сопоставление с существующими нормами. Исследовался характер деформации в упругой зоне. Рассмотрена структура материалов обмоток.

Указанный подход позволяет применить кумулятивную модель отказов в оценке надежности роторной обмотки турбогенераторов с жидкостным охлаждением [6].

Вопросы технологии и структуры. Технология слитков для последующей прессовки или проката проводниковой меди с присадкой серебра вполне устойчива. Принята технология полунепрерывного литья в кристаллизатор, чем снижается вероятность усадочных раковин и рассеянной пористости в слитке. Этот способ литья обеспечивает соблюдение норм по примесям [7]. Химсостав слитка практически повторяется в прокате.

Этой технологии, как и технологии изготовления проводников, предшествовало исследование гаммы сплавов меди с серебром в лабораторных условиях. Сплавы были шихтованы на содержание серебра 0,03; 0,06; 0,08, 0,10 %, они прокатывались на $\varnothing 4,75$ мм, отжигались и потом тянулись на проволоку $\varnothing 4,63$ мм.

Значения ρ сплавов практически одинаковы (0,0176...0,0179 Ом · мм²/м), зависимость ρ от процента Ag немонотонна.

Механические свойства определялись на образцах из проволоки $\varnothing 4,63$ мм как в нагартованном (с 5 % наклепом), так и в отожженном состоянии. Отжиг производился при температурах: 150, 200, 250, 300, 400 и 500 °С в течение 1 часа, то есть до и после рекристаллизации.

Испытание механических свойств производилось при разных температурах, начиная с комнатной и кончая 200 °С. Образцы перед испытанием нагревались с печью до нужной температуры, выдерживались при ней 15 минут и затем подвергались разрыву. Механические свойства исследуемых сплавов близки:

$$\sigma_T = 205 \dots 253 \text{ МПа}; \sigma_B = 220 \pm 29 \text{ МПа}; \delta = 36 \pm 6 \%$$

Зависимость механических свойств от процента Ag немонотонна. Во всех образцах под микроскопом видна однородная β -фаза, причем в нагартованном материале она имеет мелкозернистое равноосное строение, которое сохраняется и после отжига при температурах: 150, 200, 250 °С в течение 1 часа.

Не обнаружено также роста зерна и при 72-х часовой выдержке образцов при 250 °С. Этим и объясняется сохранение сплавами механических свойств в тех пределах, в каких они были до отжига. Отжиг при более высоких температурах, например при 500 °С, сказался на структуре уже после часовой выдержки. Зерна стали заметно крупнее. В соответствии с этим σ_B стало таким же, как для полностью отожженной меди (219...226 МПа), δ дос-

тигло 56 %, а σ_T упал до 20...40 МПа. Речь идет о переходе температуры рекристаллизации.

В настоящее время диапазон 0,03...0,10 % Ag сохранился во всех технических условиях на турбогенераторные роторные сплавы.

Роторные проводники квадратного сечения для турбогенераторов с частотой вращения $n = 3000$ об/мин изготавливаются из аналогичного сплава Cu + 0,03...0,10 % Ag. Технологический процесс предусматривает нагрев слитков в печи, горячее прессование, травление и 2 стадии волочения с вытяжкой. Для турбогенераторов с частотой вращения ротора $n = 1500$ об/мин применяются прямоугольные проводники. В отличие от квадратных труб, здесь предусматривается холодный прокат, а затем отжиг в течение 1 часа, травление и волочение с вытяжкой на готовую трубу [8].

Известно, что кристаллическая структура металла при холодной прокатке меняется. При очень сильном наклепе образуется ячеистая структура, скапливаются дислокации и дефекты решетки, возникает текстура; соответственно изменяются физические, механические и коррозионные характеристики. Такие процессы, как возврат, рекристаллизация, рост зерен, снижают упрочнение, полученное за счет наклепа при прокатке, и приближают металл к равновесному состоянию. Прокатка использована для создания желаемой структуры, текстуры, размера зерен и состояния поверхности.

Исследование механических свойств. В соответствии со стандартами и техническими условиями (ТУ) подлежат определению на образцах следующие механические характеристики проводниковой меди: временное сопротивление σ_B , МПа – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца; предел текучести условный $\sigma_{0,2}$, МПа – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % длины участка образца, удлинение которого принимается в расчет при определении указанной характеристики.

По ТУ требуется, чтобы $\sigma_{0,2} \geq 170$ МПа. Факультативно определялись также значения σ_B . Оказалось 72 годных образца.

Результаты обработки методами прикладной статистики сведены в табл. 2. Значения $\sigma_{0,2}$ и σ_B распределяются по нормальному закону при уровне значимости критерия $q = 10$ %. Сопоставление этих данных с нормами позволяет считать их вполне удовлетворительными.

Таблица 2 – Статистические характеристики механических свойств роторной меди

Исследуемые характеристики (x)	n	\bar{x}	x_{\max}	x_{\min}	m_0x	S	$S_{\bar{x}}$
$\sigma_{0,2}$	71	211	240	190	215	13,6	1,6
σ_B	72	241	255	230	245	6,06	0,71

Примечание: n – число данных, \bar{x} – среднее арифметическое (выборочное среднее) значение величины, m_0x – мода x , S – несмещенная оценка для среднего квадратического отклонения.

Наличие нормального закона распределения для $\sigma_{0,2}$ и σ_B позволяет применить методы теории надежности к роторным обмоткам турбогенераторов аналогично [6, 9].

О проекте стандарта на роторную медь. Сравнение технических условий на роторные проводники для генераторов с жидкостным охлаждением производства различных отечественных предприятий выявляет существенные различия этих нормативов. В частности, лишь одно предприятие требует трубы поставлять выправленными, притом на наружной поверхности не допускаются инородные включения, следы коррозии; на внутренней – не допускаются коксующийся остаток от смазки, чешуйчатость, складки.

Имеются серьезные различия по геометрии и механическим свойствам. Так, другое предприятие нормирует вместо $\sigma_{0,2}$ величину σ_B , факультативную в иных ТУ.

Ввиду изложенных различий в технических условиях и учитывая большую загрузку станов холодного проката, целесообразно стандартизировать роторную проводниковую медь, уменьшив число ее типоразмеров. Тогда появится техническая возможность сконцентрировать ее производство на одном-двух металлургических предприятиях.

Ранее показано, что зависимость механических свойств σ_T , σ_B и δ , а также сопротивления ρ от процента Ag немонотонна. Содержание Ag на уровне 0,03...0,10 % устанавливалось в период освоения сплава около 50 лет назад, когда распределение Ag по слитку было недостаточно равномерным. Современное качество литья позволяет снизить эту величину до 0,03...0,05 %, что следует отразить в предполагаемом стандарте.

Выводы. Установлен нормальный закон распределения механических свойств для проводникового сплава турбогенераторных роторов. Показана возможность снижения уровня присадки серебра в этом сплаве.

Перспективы данного исследования – применить к роторным обмоткам методы теории надежности, разработать стандарт на роторную медь, а также рассмотреть возможность замены серебра кадмием.

Список литературы: 1. *Станиславский Л.Я., Гаврилов Л.Г., Остерник Э.С.* Вибрационная надежность турбогенераторов. – М.: 1985. – 240 с. 2. *Болховитинов Н.Ф.* Металловедение и термическая обработка. – М.: 1961. – 464 с. 3. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. – Л.: 1967. – 722 с. 4. *Кади-Оглы И.А.* Анализ механических напряжений в полых проводниках обмотки крупных генераторов // Турбо- и гидрогенераторы большой мощности. Сб. науч. тр., 1969. – С. 189-201. 5. Технология крупного электромашиностроения. В 3-х ч. Ч. 1. Турбогенераторы. – М.-Л.: 1966. – 335 с. 6. *Остерник Э.С.* О механических параметрах для оценки надежности турбогенераторов // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. науч. тр. Тем. выпуск «Динамика и прочность машин». – № 52. – 2011. – С. 142-156. 7. *Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М.* Литейное производство цветных и редких металлов. – М.: 1972. – 496 с. 8. *Чувашинов Ю.Н., Богданов Н.Т., Соловьев О.П.* и др. Новые процессы и оборудование для производства труб из цветных металлов и сплавов. – М.: 1972. – 44 с. 9. *Остерник Э.С.* О стохастической модели статора турбогенератора // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. науч. тр. Тем. выпуск «Динамика и прочность машин». – № 22. – 2007. – С. 135-147.

Поступила в редколлегию 20.09.2012.