

**Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА**



**В. А. БУЛАТКИН
И. Я. ГУРЬЕВ
Р. М. СЕМКИН**

РЕМОНТ РОТОРНЫХ БАНДАЖЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ



БИБЛИОТЕКА
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

621.3.111
Б90

ВЫПУСК 383

В. А. БУЛАТКИН, И. Я. ГУРЬЕВ,
Р. М. СЕМКИН

15/87
РЕМОНТ
РОТОРНЫХ
БАНДАЖЕЙ
ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1973

6П2.23

Б 90

УДК 621.313.322—81.004.67

Редакционная коллегия:

Большам Я. М., Зевакин А. И., Каминский Е. А., Мандрыкин С. А., Розанов С. П., Семенов В. А., Синбугуов Ф. И., Смирнов А. Д., Соколов Б. А., Устинов П. И.

Булаткин В. А. и др.

Б 90 Ремонт роторных бандажей турбогенераторов. М., «Энергия», 1973.

96 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 383).

Перед загл. авт.: В. А. Булаткин, И. Я. Гурьев, Р. М. Семкин.

В брошюре изложен опыт ремонта и реконструкции роторных бандажей турбогенераторов отечественного производства. Приведены краткие сведения о конструкции роторных бандажей, материалах для изготовления и характере механических нагрузок. Подробно рассмотрены технология разборки и сборки, методы оценки состояния деталей и характерные виды повреждений с указанием причин их возникновения и способов устранения.

Даны рекомендации по улучшению конструкции роторных бандажей с целью повышения надежности их работы, а также по изготовлению деталей в случае их замены и реконструкции. Брошюра рассчитана на квалифицированных электрослесарей и инженерно-технических работников, занятых ремонтом и эксплуатацией турбогенераторов.

Б 3310-257
051(01)-73 82-73

6П2.23

© Издательство «Энергия», 1973 г.

ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ БУЛАТКИН

ИВАН ЯКОВЛЕВИЧ ГУРЬЕВ

РЕВОЛЬД МИХАЙЛОВИЧ СЕМКИН

РЕМОНТ РОТОРНЫХ БАНДАЖЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Редактор В. Ю. Аврух

Редактор издательства Л. В. Копейкина

Обложка художника А. А. Иванова

Технический редактор Г. Г. Хацкевич

Корректор И. Д. Панина

Сдано в набор 6/XII 1972 г. Подписано к печати 3/VI 1973 г. Т-10756
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 5,04 Уч.-изд. л. 5,41

Тираж 9 000 экз. Цена 20 коп. Зак. 1475

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие энергетики обуславливает создание все более мощных турбогенераторов, для которых высокая надежность работы является одним из основных показателей. Роторный бандаж как наиболее нагруженный узел турбогенератора предъявляет в этом отношении значительные требования как на стадии изготовления, так и эксплуатации и ремонта.

В брошюре обобщен опыт энергоремонтных предприятий по ревизии, ремонту и реконструкции бандажей. Кратко изложены конструкции роторных бандажей современных турбогенераторов, приведены характеристики материалов деталей бандажа.

Наибольшее внимание в брошюре уделяется описанию типичных повреждений бандажных и центрирующих колец, причинам их возникновения, влиянию эксплуатационных режимов на надежность работы бандажей. Показано, что для высокоиспользованных генераторов с высокими линейными нагрузками имеющие место отклонения от нормальных режимов вызывают необходимость установки демпферных систем, защищающих как торцовые зоны ротора, так и бандаж.

В основной части брошюры изложены способы поиска дефектов бандажных и центрирующих колец, методы ремонта бандажей при типовых повреждениях. Приведены также характерные виды реконструкций, позволяющие повысить надежность работы. Даются рекомендации по рациональным приемам при сборке и разборке бандажей.

Авторы

1. НАЗНАЧЕНИЕ РОТОРНОГО БАНДАЖА И ХАРАКТЕР НАГРУЗОК

Роторный бандаж турбогенератора предназначен для закрепления лобовых частей обмотки ротора как в радиальном, так и в осевом направлениях; состоит из двух основных деталей: бандажного и центрирующего колец (рис. 1, а). Бандажное кольцо удерживает лобовые части обмотки ротора в радиальном направлении при его вращении. Центрирующее кольцо удерживает обмотку ротора в осевом направлении при ее тепловом расширении. Кроме того, центрирующее кольцо обеспечивает сохранение цилиндрической формы бандажного кольца и центрирует его относительно оси вала ротора. В некоторых конструкциях это кольцо не имеет посадки на вал ротора. В этом случае оно называется упорным кольцом. Центрирующее кольцо используется для размещения балансировочных грузов и в ряде конструкций

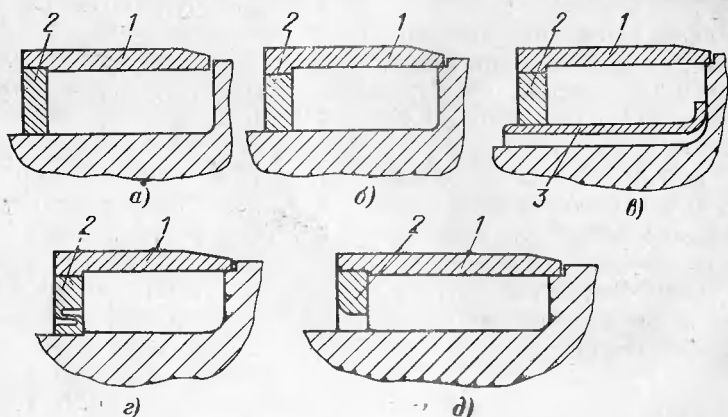


Рис. 1. Конструкция роторных бандажей.

а — однопосадочный (отставленный) бандаж; б — двухпосадочный бандаж; в — двухпосадочный бандаж с промежуточной втулкой; г — двухпосадочный бандаж с Z-образным центрирующим кольцом; д — консольный бандаж; 1 — бандажное кольцо; 2 — центрирующее кольцо; 3 — промежуточная втулка.

для крепления центробежных вентиляторов. Сопряжение деталей роторного бандажа осуществляется горячей посадкой с натягом, величина которого определяется механическим расчетом. Применение горячей посадки обусловлено необходимостью плотного соединения деталей роторного бандажа прежде всего на рабочей частоте вращения, а также при испытаниях ротора на угонную частоту после изготовления на заводе и испытания автомата безопасности турбины при эксплуатации турбогенератора.

Нарушение плотности соединения деталей роторного бандажа при вращении ротора может привести к смещению масс и, как следствие, к ухудшению вибрационного состояния машины.

Бандажное кольцо является наиболее нагруженной в механическом отношении деталью турбогенератора. Оно постоянно находится в напряженном состоянии как в покое, так и во время вращения ротора. В состоянии покоя в бандажном кольце действуют напряжения от натяга горячей посадки. При вращении ротора в нем действуют напряжения от центробежных сил собственной массы и массы лобовых частей и напряжения от остаточного натяга. В современных крупных турбогенераторах напряжения в бандажном кольце в состоянии покоя находятся на уровне 40—42 кгс/мм².

При вращении с номинальной частотой суммарные напряжения составляют величину около 45 кгс/мм², а при разгонной частоте достигают кратковременно величины 60 кгс/мм².

Под действием центробежных сил при вращении ротора происходит упругая деформация бандажного и центрирующего колец с увеличением их диаметра. В результате деформации бандажного кольца при вращении ротора происходит уменьшение натяга горячей посадки. В пределе существует такая частота вращения, при которой натяг будет полностью выбран. Масса лобовых частей обмотки ротора распределена неравномерно по окружности. Эпюра центробежных сил, вызванных массой лобовых частей, имеет форму эллипса, причем вблизи центрирующего кольца большая ось эллипса совпадает с осью большого зубца ротора, а вблизи бошки ротора — перпендикулярна к ней. Поэтому в бандажном кольце кроме растягивающих усилий возникают изгибающие моменты, стремящиеся придать бандажно-

му кольцу овальную форму. Эти дополнительные напряжения изгиба при определенных условиях могут вызвать остаточные деформации.

Избежать этого явления удастся путем обеспечения достаточной плотности посадки бандажного кольца во всех возможных режимах.

Частоту вращения, при которой натяг становится равным нулю, принято называть разъединительной частотой. Для обеспечения нормальной работы роторного бандажа величина разъединительной частоты должна быть несколько выше максимально возможной (испытательной) или, по крайней мере, выше рабочей частоты вращения. При расчетах двухполюсных турбогенераторов разъединительная частота выбирается обычно в пределах: для турбогенераторов с диаметром ротора до 850 мм не менее 3 800 об/мин, для турбогенераторов с диаметром ротора свыше 850 мм — 3 400—3 600 об/мин для посадочного места бандажное кольцо — бочка ротора и 3 600—3 800 об/мин для посадочного места бандажное кольцо — центрирующее кольцо. Разъединительная частота для центрирующего кольца во всех случаях должна быть не ниже 3 800 об/мин.

Суммарные напряжения в бандажном кольце состоят из напряжений от центробежных сил и от остаточного натяга. Основную часть этих напряжений составляют напряжения от центробежных сил (до 70% при рабочей скорости вращения и до 90% при испытательной скорости), причем на долю массы лобовых частей приходится примерно 30% этих напряжений, остальная же часть обусловлена центробежными силами собственной массы.

Стремление обеспечить требуемую величину разъединительной частоты неизбежно влечет за собой увеличение суммарных напряжений, а следовательно, снижение запаса прочности бандажного кольца. На основании длительного опыта эксплуатации отечественных турбогенераторов считается допустимой такая величина суммарных напряжений, при которой запас прочности бандажного кольца по отношению к пределу текучести материала был бы не менее 1,6 при испытательной частоте вращения, на 20% превышающей номинальную частоту.

Принятые допуски на обработку деталей роторного бандажа по второму классу точности обуславливают за-

метную разницу между максимальным и минимальным натягами. Так, при диаметре деталей около 1 м эта величина составляет 0,1 мм. Кроме того, детали роторного бандажа при нормальном режиме работы турбогенератора имеют различную температуру. Бандажное кольцо, как правило, имеет температуру на 25—30°C выше, чем центрирующее кольцо и бочка ротора. Это существенно сказывается на величинах разьединительных частот и запасов прочности деталей. Поэтому при расчетах разьединительной частоты принимается минимальный остаточный натяг в горячем состоянии, а при расчете напряжений — максимальный остаточный натяг в холодном состоянии.

Изложенные выше обстоятельства имеют особо важное значение при ремонтах роторных бандажей крупных турбогенераторов, у которых бандажные кольца имеют предельные расчетные значения как по запасу прочности, так и по разьединительной частоте, а в отдельных случаях при минимальном запасе прочности разьединительная частота (расчетная) имеет величину ниже испытательной. Поэтому любое отклонение от заданных заводом величин натягов может привести к нарушению нормальной работы роторного бандажа.

2. МАТЕРИАЛЫ ДЕТАЛЕЙ РОТОРНЫХ БАНДАЖЕЙ

Из-за значительных механических нагрузок и конструктивных особенностей турбогенератора к материалам роторных бандажей предъявляются довольно жесткие требования по механическим и физическим свойствам. В настоящее время все турбогенераторы мощностью 25 МВт и выше выпускаются с бандажными кольцами из немагнитной стали. В последние годы широкое распространение получила аустенитная сталь марки 60ХЗГ8Н8В. Изготовление поковок из этой стали производится по специальным техническим условиям МВТУ-УМ-66-1, предусматривающим четыре категории поковок, механические свойства которых приведены в табл. 1.

Для поковок I категории допускается применение хромомарганцевой аустенитной стали марки 40Х4Г18. Химический состав сталей для немагнитных бандажных колец приведен в табл. 2.

Таблица 1

Категория	Зона отбора образцов для испытания	Предел текучести, кгс/см ²	Временное сопротивление, кгс/см ²	Относительное удлинение, %	Относительное сжатие, %	Угол загиба на отравке 40 мм, град.	Ударная вязкость, кгс/мм ²
I	Внутренняя	6 000	7 500	25	35	180	8
II	Внутренняя	7 200	8 500	22	35	180	8
III	Наружная	8 000	9 000	20	35	—	—
	Внутренняя	8 500	9 500	20	35	180	8
IV	Наружная	8 500	9 300	20	35	—	—
	Внутренняя	9 000	9 800	20	35	180	8

Магнитная проницаемость сталей 60Х3Г8Н8В и 40Х4Г18 близка к единице и обычно не превышает 1,01—1,03, удельное электросопротивление в рабочем диапазоне температур находится в пределах 0,7—0,8 Ом·мм²/м. Такие физические свойства обеспечивают требуемый электрическим расчетом уровень потерь в бандажном кольце от полей рассеяния лобовых частей обмотки статора.

Таблица 2

Марка стали	Химический состав, %			
	C	Cr	Ni	Mn
60Х3Г8Н8В	0,58—0,68	3,0—4,0	7,5—9,0	7,5—9,5
40Х4Г18	0,37—0,45	3,0—4,0	—	17,0—19,0

Продолжение табл. 2

Марка стали	Химический состав, %				
	W	Si	S	P	N
60Х3Г8Н8В	0,5—1,0	До 0,5	Не более 0,3	Не более 0,04	—
40Х4Г18	—	0,2—0,8	Не более 0,03	Не более 0,05	Не более 0,15

Изготовление поковок для немагнитных бандажных колец представляет собой сложный и трудоемкий технологический процесс. Заготовка после прошивки отверстий, раскатки и предварительной механической обработки подвергается специальной термической обработке — аустенизации. Для повышения прочностных свойств поковка подвергается холодному или полугорячему наклепу. После наклепа заготовка подвергается отпуску для снятия остаточных напряжений. Заключительной операцией по изготовлению поковки являются окончательная обдирка и отрезка колец для взятия образцов.

На каждой поковке со стороны низа слитка выбиваются номера чертежа, плавки и поковки, а также клеймо ОТК завода-поставщика. Кроме того, наносятся кернения минимальной и максимальной толщины заготовки бандажного кольца. Поковка сопровождается паспортом, в который заносятся все выбитые на поковке номера, данные о химическом составе стали, температурный интервал наклепа и результаты всех проведенных испытаний.

Создание новых более мощных турбогенераторов предъявляет новые, более высокие требования к материалу бандажных колец. Особенно перспективным материалом для немагнитных бандажных колец являются титановые сплавы, обладающие всеми необходимыми для высоконагруженных бандажных колец свойствами. Преимуществами титановых сплавов являются высокая прочность, немагнитность, малая плотность (плотность титана в 1,7 раза меньше плотности стали) и коррозионная стойкость. Широкое применение титана как материала для немагнитных бандажных колец пока сдерживается недостаточной изученностью его свойств. Проведенными исследованиями уже установлены некоторые специфические особенности титановых сплавов. Например, модуль упругости титановых сплавов почти в 2 раза ниже, чем у стали. В результате бандажное кольцо, изготовленное из такого сплава, имеет настолько большую податливость, что практически исключает возможность закрепления его горячей посадкой. Это обстоятельство требует новых конструктивных решений в креплении бандажного кольца. Важным достоинством титанового сплава является так называемый фактор прочности — отношение предела текучести к плотности. Поскольку при переходе на больший диаметр фактор прочности должен изменяться пропорционально квадрату отношения радиальных размеров ротора (при сохранении геометрических пропорций), то применение титановых сплавов открывает большие возможности в дальнейшем увеличении диаметра ротора.

Положительное решение всех вопросов, связанных с применением титановых сплавов в качестве материала для бандажных колец, позволит в значительной мере облегчить задачу по созданию сверхмощных турбогенераторов.

В качестве материала для магнитных бандажных колец, центрирующих колец и стопорных гаек применяются низколегированные конструкционные стали, марки которых и их химический состав приведены в табл. 3.

Таблица 3

Марка стали	Химический состав, %				
	C	Mn	Si	S	P
35ХМАР	0,32—0,42	0,25—0,50	0,17—0,37	0,025	0,025
35ХН1МАР	0,32—0,42	0,25—0,50	0,17—0,37	0,025	0,025
35ХН1МФАР	0,32—0,42	0,25—0,50	0,17—0,37	0,025	0,025
35ХВ	0,32	0,25	0,17	0,025	0,025
38ХВА	0,42	0,50	0,37	—	—
35Х	0,30—0,40	0,5—0,8	0,17—0,37	0,040	0,40
35ХН3МАР	0,32—0,42	0,25—0,5	0,17—0,37	0,025	0,025
35ХНМФАР	0,32—0,42	0,20—0,40	0,17—0,37	0,025	0,025

Продолжение табл. 3

Марка стали	Химический состав, %				
	Cr	Ni	Mo	V	W
35ХМАР	0,9—1,3	0,5	0,82—0,40	—	—
35ХН1МАР	1,3—1,7	1,3—1,7	0,30—0,40	—	—
35ХН1МФАР	1,3—1,7	1,3—1,7	0,30—0,40	0,08—0,15	—
35ХВ	0,9	0,8	—	—	0,50
38ХВА	1,3	—	—	—	0,80
35Х	0,7—1,0	0,4	—	—	—
35ХН3МАР	1,1—1,4	2,75—3,25	0,30—0,40	—	—
35ХНМФАР	1,1—1,4	2,75—3,25	0,30—0,40	0,08—0,15	—

Примечания: 1. Допускается применять и другие марки стали, а также марки стали по ГОСТ 1050-60 и ГОСТ 4548-61.

2. Буква Р в обозначении марки стали означает сталь роторную.

Поковки для этих деталей изготавливаются по техническим условиям ТУ 16-582001-70, которыми предусматривается семь категорий прочности. Механические свойства и рекомендуемые марки сталей для каждой категории прочности приведены в табл. 4. Допускается применение для центрирующих колец аналогичных по химическому составу и механическим свойствам сталей марок 40Х, 34ХМ, 34ХН1М и 34ХН3М. Выбор соответствующей категории прочности производится по результатам механического расчета в зависимости от действующих в детали

суммарных напряжений и принятых запасов прочности. По ранее действовавшим ТУ для магнитных бандажных колец и центрирующих колец применялись стали марок ОХМ1М и ОХНЗМ, которые аналогичны сталям по действующим ТУ.

Таблица 4

Характеристики	Механические характеристики материалов при категориях		
	I	II	III
Предел текучести, кгс/см ²	3 000	4 000	5 000
Предел прочности, кгс/см ²	5 000	6 000	7 000
Относительное удлинение, %	16	16	16
Относительное сжатие, %	30	30	30
Ударная вязкость, кгс/см ²	3	5	4
Рекомендуемые марки стали . . .	Ст. 35, 35Х	38ХМА, 35ХМАР	38ХМА, 38ХВА, 35ХМАР

Продолжение табл. 4

Характеристики	Механические характеристики материалов при категориях			
	IV	V	VI	VII
Предел текучести, кгс/см ²	6 000	7 000	8 000	9 000
Предел прочности, кгс/см ²	7 800	8 500	9 500	10 300
Относительное удлинение, %	16	14	13	12
Относительное сжатие, %	35	35	30	30
Ударная вязкость, кгс/см ²	5	5	4	4
Рекомендуемые марки стали	35ХН1МАР	35ХН1МАР	35ХН1МФАР, 35ХНЗМФАР	35ХНЗМФАР

На каждой поковке со стороны низа слитка выбираются номера плавки, слитка, поковки, чертежа, а также клеймо ОТК завода-поставщика. Поковка снабжается паспортом (сертификатом), содержащим данные по всем основным элементам технологического процесса (плавка, ковка, термическая обработка), и данные о химическом составе стали и результатах проведенных испытаний.

3. КОНСТРУКЦИИ РОТОРНЫХ БАНДАЖЕЙ

Основной деталью роторного бандажа является бандажное кольцо. Наружный диаметр бандажного кольца на 15—20 мм меньше диаметра расточки статора для обеспечения свободной заводки ротора в статор. Внутренняя поверхность бандажного кольца конусная с уклоном 1—4° для удобства снятия и надевания бандажа. Диаметры внутренней поверхности определяются положением лобовых частей обмотки с учетом подбандажной изоляции. Таким образом, толщина стенки бандажного кольца ограничена довольно небольшими пределами и практически составляет 40—50 мм для роторов с диаметром до 850 мм и 60—85 мм для роторов с диаметром более 850 мм.

На генераторах ранних выпусков бандажные кольца имели довольно сложную форму, вызванную наличием демпферной системы и двойного конуса лобовых частей. В дальнейшем наметилась тенденция к более простой форме сечения бандажного кольца с минимальным количеством поверхностей с различными диаметрами. В течение ряда лет на некоторых отечественных генераторах (Т-25-2, ТГВ-25, ТВ-30-2) и генераторах зарубежных фирм (ДЖИИ, Сименс-Шуккерт, Метро-Веккерс) применялись бандажные кольца с большим количеством радиальных отверстий для улучшения вентиляции лобовых частей обмотки ротора. Как показал многолетний опыт эксплуатации таких генераторов, наличие вентиляционных отверстий резко снижает надежность работы бандажного кольца. В последние годы отечественными заводами бандажные кольца с вентиляционными отверстиями не применяются, а находящиеся в эксплуатации при случае заменяются на бандажные кольца без отверстий.

По количеству посадочных поверхностей на роторе различают два основных типа роторных бандажей — однопосадочный и двухпосадочный. Кроме того, за последние годы получила распространение консольная посадка роторных бандажей. При однопосадочной конструкции бандажное кольцо имеет посадку только на центрирующее кольцо, которое в свою очередь посажено на вал ротора (рис. 1, а). В этом случае носик бандажного кольца имеет возможность свободного перемещения в радиальном и осевом направлениях относительно бочки из-за

прогиба ротора. Величина этих перемещений зависит от величины прогиба участка вала между торцами бочки и подшипником и от длины и диаметра бандажного кольца. При определенных значениях перемещений носика возможны разрушения подбандажной изоляции и верхних витков обмотки ротора. Поэтому область применения одно посадочных отставленных роторных бандажей весьма ограничена.

По способу сопряжения деталей роторные бандажи выполняются двух видов: с совместным снятием бандажного и центрирующего колец и с отдельным их снятием. Роторные бандажи с совместным снятием деталей менее технологичны при ремонтах и поэтому на современных турбогенераторах практически не применяются. Основными недостатками такой конструкции являются необходимость одновременного нагрева всего бандажа, необходимость снятия полумуфты, а иногда и контактных колец при снятии бандажей. Кроме того, совместное снятие бандажного и центрирующего колец исключает возможность плотного расклинивания обмотки ротора в осевом направлении при производстве ремонта обмотки, связанного с удалением деталей расклиновки, особенно при наличии деформации витков катушек. Конструкция с отдельным снятием деталей бандажа лишена этих недостатков. При отдельном снятии нагревается только бандажное кольцо, что значительно упрощает операции по его снятию. Снятие же центрирующих колец в большинстве случаев ремонта обмотки и не требует.

При двух посадочной конструкции роторного бандажа бандажное кольцо имеет посадку на центрирующее кольцо и на заточку бочки ротора (рис. 1, б). В двух посадочном бандаже с жестким центрирующим кольцом знакопеременные усилия от прогиба вала передаются на посадочное место бандажного кольца на бочку ротора. При определенных соотношениях размеров ротора эти усилия становятся настолько значительными, что могут привести к разрушению посадочных поверхностей как бочки ротора, так и носика бандажного кольца. На роторах с относительно большой длиной вылета лобовых частей обмотки (более 500 мм) и значительной величиной прогиба вала двух посадочная конструкция роторного бандажа с жесткими центрирующими кольцами оказалась вообще неработоспособной. Поэтому на турбогенераторах мощностью 50 МВт и выше применяются

специальные меры, снижающие или полностью устраняющие действие знакопеременных усилий от прогиба вала на бандажное кольцо. Одним из решений является посадка центрирующего кольца на промежуточную втулку, закрепленную на торце бочки ротора (рис. 1, в). В этом случае оба конца бандажа связаны только с боч-

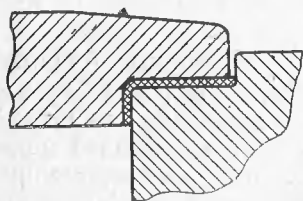


Рис. 2. Изоляция бандажного кольца от бочки ротора.

кой ротора и колебания вала не передаются на бандаж. Такая конструкция применялась некоторыми зарубежными фирмами (например, Метро-Веккерс) и заводом «Электросила» на турбогенераторах типов Т2-100-2 и ТВ-100-2. Применение промежуточной втулки вынуждает существенно уменьшить диаметр вала под лобовыми ча-

стями, что снижает прочность вала в наиболее опасном сечении и критическую скорость ротора. Поэтому конструкция роторного бандажа с промежуточной втулкой не получила дальнейшего применения. Заводом «Электросила» была разработана и внедрена на всех турбогенераторах мощностью 50 МВт и выше конструкция эластичного Z-образного центрирующего кольца (рис. 1, г). Такое центрирующее кольцо имеет повышенную податливость в осевом и радиальном направлениях. В результате колебания вала ротора частично поглощаются гибким элементом кольца и не передаются на бандажное кольцо. Другим недостатком двухпосадочной конструкции роторного бандажа является возможность местных нагревов и оплавлений посадочных поверхностей бочки и носика бандажного кольца токами. Предохранить бандажное кольцо от повреждения можно создав либо хороший контакт по посадочной поверхности, либо гарантированный зазор. Создание хорошего контакта при двухпосадочной конструкции трудно выполнимо. Поэтому эту задачу решают путем посадки носика бандажного кольца на бочку через изоляционную прокладку (рис. 2). Такая посадка в какой-то степени снижает вредное действие знакопеременных усилий от прогиба вала. Изоляционная прокладка толщиной 2,5—3 мм выполняется из стеклотекстолита марки СТЭФ в виде Г-образных сегментов либо в виде плоских прокладок из листового ма-

териала. Таким образом, применение эластичных центрирующих колец и посадка носика бандажного кольца на изоляционную прокладку в значительной степени повысили надежность работы двухпосадочного роторного бандажа. Однако двухпосадочная конструкция бандажа не удовлетворяет требованиям надежности для крупных турбогенераторов. Консольный роторный бандаж (рис. 1, д) имеет горячую посадку только на бочку ротора. Тыльная часть бандажного кольца посажена на упорное кольцо, которое не связано с валом. Следовательно, бандажное кольцо не испытывает знакопеременных усилий от прогиба вала. Консольная посадка роторных бандажей впервые была применена заводом «Электротяжмаш» на генераторе ТГВ-25. Аналогичная конструкция бандажа принята и для других генераторов этой серии (ТГВ-200, ТГВ-300 и ТГВ-500). Заводом «Электросила» также разработана конструкция роторного бандажа с консольной посадкой. Опытная эксплуатация генераторов ТГВ-200-2 и ТГВ-500-2 с консольными бандажами показала перспективность применения такой конструкции на крупных турбогенераторах. Эксплуатация генераторов серии ТГВ показала высокую надежность работы консольных роторных бандажей. Известны несколько случаев подгара носиков бандажных колец в результате отклонений от правил эксплуатации (длительная работа генератора в несимметричном режиме). Для консольной посадки проблематичным является вопрос крепления бандажа от осевого смещения.

В любой конструкции на роторный бандаж во время работы действуют силы, стремящиеся сдвинуть бандаж с посадочных мест. Это происходит, во-первых, из-за наличия аксиальной составляющей центробежной силы массы лобовых частей обмотки, обусловленной конусностью внутренней поверхности бандажного кольца, и, во-вторых, из-за частичной передачи на детали роторного бандажа усилий от температурного расширения обмотки. Действие этих сил усугубляется знакопеременными усилиями, действующими на бандаж в результате прогиба вала во время вращения. Суммарная величина этих сил может достигать нескольких десятков тонн. Поэтому в любой конструкции всегда предусматриваются элементы крепления деталей роторного бандажа от осевого смещения. Для крепления центрирующего кольца наиболее распространенными являются способы крепления наклонными стопорными винтами (рис. 3,а). Винты располагаются в стыке центрирующего кольца и вала под углом 18° к оси машины. Такой способ применялся на генераторах первых лет выпуска (до 1939 г.) и, как показал опыт, не является надежным. Завод «Электросила» в дальнейшем перешел на более совершенное крепление с помощью стопорной гайки. Крепление стопорной гайкой (рис. 3,б) обеспечивает высокую надежность и удобство сборки и

разборки узла. Против самоотворачивания гайка стопорится специальной шайбой. Такой способ крепления требует специальных поковок для изготовления гаек. Более простым и достаточно надежным способом является крепление с помощью упорных планок (рис. 3, в). Упорные планки устанавливаются в пазы на валу ротора и закрепляются к валу болтами. Такая конструкция крепления применяется

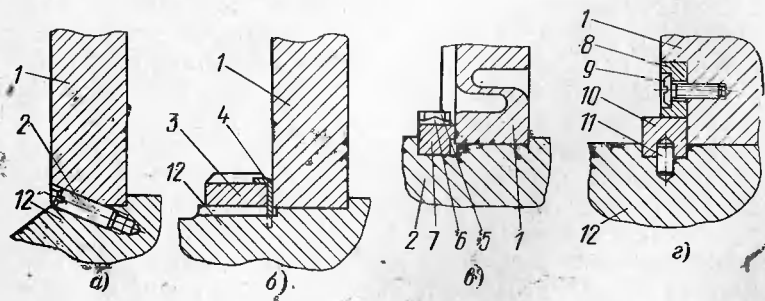


Рис. 3. Способы крепления центрирующих колец.

1 — центрирующее кольцо; 2 — стопорный винт; 3 — стопорная гайка; 4 — шайба; 5 — болт; 6 — пластинчатая шайба; 7 — упорная планка; 8 — планка; 9 — винт; 10 — шпонка; 11 — штифт; 12 — вал.

на всех современных генераторах (серий ТВ, ТВФ и ТВВ). Исключение составляет генератор ТВС-30, у которого центрирующее кольцо крепится шпонками (рис. 3, г). Каждая из восьми шпонок устанавливается в канавку на валу ротора и удерживается в рабочем положении планкой, закрепленной двумя винтами в выточке на торце центрирующего кольца. Шпонки фиксируются в тангенциальном направлении цилиндрическими штифтами.

Бандажное кольцо крепится от осевого смещения в случае раздельного снятия и при консольной посадке. Существуют различные способы крепления. На генераторах серий Т2 и ТВ для этой цели используется промежуточное кольцо (рис. 4, а) или центробежный вентилятор (рис. 4, б), которые закрепляются болтами к центрирующему кольцу. Такой способ крепления прост и удобен при разборке и сборке и надежно удерживает бандажное кольцо от смещения. На генераторах с осевыми вентиляторами (ТВ2-100-2 и ТВ2-150-2) крепление бандажного кольца осуществляется пружинным кольцом, расположенным в месте посадки на центрирующее кольцо (рис. 4, в). Для осаживания пружинного кольца в канавку при снятии бандажного кольца в его тыльной части предусмотрены отверстия. Такую конструкцию крепления нельзя признать удачной, так как пружинное кольцо полностью закрыто бандажным кольцом и выполнение операций по его снятию требует большого опыта ремонтного персонала. Конструкция требует высокой точности и аккуратности исполнения. Малейшие забоины и деформации пружинного кольца могут вызвать серьезные затруднения при снятии бандажного кольца. Кроме того, такая конструкция крепления обуславливает необходимость сверления отверстий в наиболее напряженной части бандажного кольца.

Более совершенная конструкция крепления применена на генераторах серии ТВФ и ТВВ (рис. 4, д). Расположение пружинного

кольца обеспечивает свободный доступ к нему и значительно упрощает операции по снятию бандажного кольца. На генераторах ТВС-30 крепление бандажного кольца осуществляется кольцевой шпонкой, состоящей из четырех частей (рис. 4,з). Шпонка закладывается в кольцевую канавку на центрирующем кольце через выточку

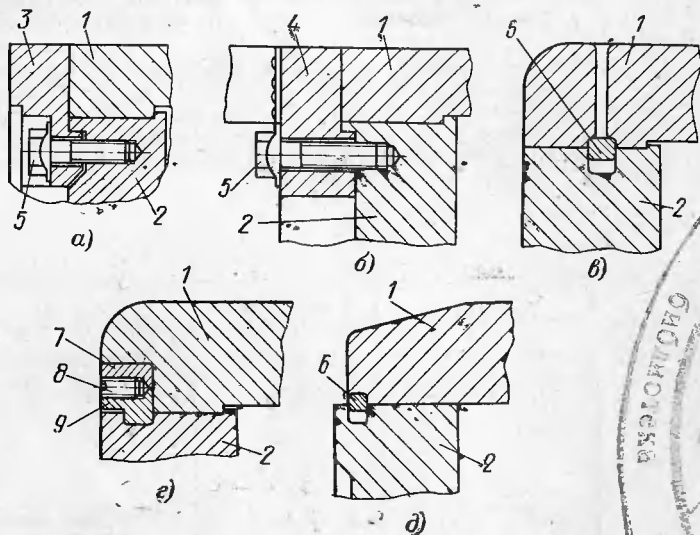


Рис. 4. Способы крепления бандажных колец.

1 — бандажное кольцо; 2 — центрирующее кольцо; 3 — промежуточное кольцо; 4 — вентилятор; 5 — болт; 6 — пружинное кольцо; 7 — закладное кольцо; 8 — винт; 9 — шпонка.

на торце бандажного кольца и удерживается в рабочем положении кольцом, также состоящим из четырех частей. Закладное кольцо стопорится относительно кольцевой шпонки винтами.

Крепление от осевого смещения консольных бандажей выполняется также различными способами. На генераторах ТВГ-25 для этой цели применена кольцевая шпонка в месте посадки бандажного кольца на бочку ротора (рис. 5,а). Для осаживания шпонки в ка-

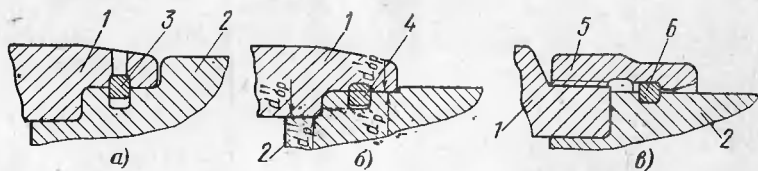


Рис. 5. Способы крепления консольных бандажей.

1 — бандажное кольцо; 2 — бочка ротора; 3 — кольцевая шпонка; 4 — сегментная шпонка; 5 — гайка; 6 — пружинное кольцо.

Навку в носиковой части бандажного кольца предусмотрены отверстия. Такая конструкция крепления неудобна с точки зрения разборки соединения, так как возможно заклинивание шпонки по причине смещения пазовых клиньев, наличия наплывов лака в канавке и деформации самой шпонки.

На генераторах ТГВ-200 и ТГВ-300 бандаж закрепляется на бочке ротора сегментными шпонками (рис. 5,6). Сегментная шпонка представляет собой часть кольца, на внутренней поверхности которого выполнены зубцы с шагом, равным зубцовому делению ротора.

Сегментные шпонки закладываются в кольцевую канавку носика бандажного кольца и после насадки бандаж перемещаются по окружности на половину зубцового деления так, чтобы зубцы шпонок заходили в канавки на зубцах ротора.

Тип турбогенератора	Тип бандаж	Вид центрирующего кольца	Способ посадки бандаж на бочку
T2-25-2	Двухпосадочный	Жесткое	Без изоляции
ТВ2-30-2	"	"	То же
ТГВ-25	Однопосадочный консольный	"	" "
ТВС-30	Однопосадочный отставленный	"	" "
T2-50-2	Двухпосадочный	"	Без изоляции
ТВ-50-2	"	Z-образное	То же
ТВ-60-2	"	"	Через изоляционные сегменты (рис. 2)
ТВ2-100-2	"	"	Без изоляции
ТВФ-60-2	"	"	Через изоляционные сегменты (рис. 2)
ТВФ-100-2	"	"	Через изоляционные сегменты (рис. 2)
ТВВ-165-2	"	"	Через изоляционные сегменты (рис. 2)
ТВВ-200-2	"	"	Через изоляционные сегменты (рис. 2)
ТВВ-320-2	"	"	Через изоляционные сегменты (рис. 2)
ТВВ-320-2	Однопосадочный консольный	Жесткое	Без изоляции
ТВВ-500-2	То же	"	То же
ТГВ-200	"	"	"
ТГВ-300	"	"	"
ТГВ-500	"	"	"

Консольные бандажные генераторов ТВВ-320-2 и ТВВ-500-2 крепятся на бочке ротора гайкой (рис. 5, в). Гайка навинчивается на носиковую часть бандажного кольца, упираясь заточкой на внутренней поверхности в пружинное кольцо, заложённое в канавку на бочке ротора. Упорные кольца консольных бандажных генераторов серии ТГВ фиксируются относительно бандажных колец кольцевыми шпонками (рис. 6, а), а генераторов серии ТВВ — пружинными кольцами (рис. 6, в), причем конструкцией предусмотрена возможность разборки соединения.

На генераторах с длиной ротора более 3 м предусматриваются специальные устройства для компенсации тепловых расширений обмотки ротора. Назначение таких устройств в том, чтобы лобовые части обмотки в любом тепловом режиме имели опору на центрирующее кольцо с некоторой свободой перемещения в осевом на-

Таблица 5

Способ крепления бандажного кольца	Способ крепления центрирующего кольца	Особенности конструкции
Промежуточным кольцом (рис. 4, а)	Стопорными винтами (рис. 3, а), стопорной гайкой (рис. 3, б)	Совместное снятие (двоенный выпуск), раздельное снятие (послевоенный выпуск) с вентиляционными отверстиями
То же	Стопорной гайкой (рис. 3, б)	С вентиляционными отверстиями
Кольцевой шпонкой (рис. 5, а)	Кольцевой шпонкой (рис. 6, а)	То же
Кольцевой шпонкой (рис. 4, д)	Шпонками (рис. 3, в)	С овальными вентиляционными выборками на торце носика
Вентилятором (рис. 4, б)	Стопорными винтами (рис. 3, а), стопорной гайкой (рис. 3, б)	Совместное снятие (двоенный выпуск), раздельное снятие (послевоенный выпуск)
То же	Стопорной гайкой (рис. 3, б)	Жесткие центрирующие кольца (первые выпуски)
" "	Упорными планками (рис. 3, в)	Посадка на бочку без изоляции (первые выпуски)
Пружинным кольцом (рис. 4, в)	То же	
Пружинным кольцом (рис. 4, з)	Упорными планками (рис. 3, в)	
Гайкой (рис. 5, в)	Пружинным кольцом (рис. 6, б)	
Сегментной шпонкой (рис. 5, б)	Кольцевой шпонкой (рис. 6, а)	

правлении. Это достигается установкой между торцами обмотки и центрирующего кольца упругого элемента. На генераторах Т2-50-2 (довоенное исполнение) для этой цели применялись винтовые пружины с сухарями (рис. 7,а), на которые опирается стальной диск. В свободном состоянии (до насадки бандажа) сухари выступают

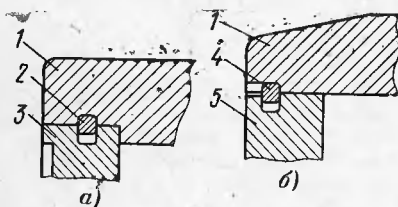


Рис. 6. Крепление центрирующих колец консольных бандажей.

а — генераторов серии ТГВ; б — генераторов серии ТВВ; 1 — бандажное кольцо; 2 — кольцевая шпонка; 3 — упорное кольцо; 4 — пружинное кольцо; 5 — центрирующее кольцо.

над поверхностью центрирующего кольца на 6 мм. Толщина торцевой шайбы подбирается такой, чтобы после насадки бандажа пружины были сжаты на 2 мм. Это соответствует первоначальному усилию нажатия на обмотку около 1000 кгс. Аналогичная конструкция устройства для компенсации тепловых расширений обмотки применялась на генераторах ТГВ-25. На генераторах серии ТВ в качестве упругого элемента использовался стальной диск, опирающийся на центрирующее кольцо через дистанционные сегменты в зонах, расположенных по оси больших зубцов

ротора (рис. 7,б). На генераторах серий ТВФ и ТВВ вместо дистанционных сегментов применяются нажимные винты (рис. 7,в). На генераторах ТГВ-200, ТГВ-300 и ТГВ-500 в качестве упругого элемента используется наборное пружинное кольцо (рис. 7,г).

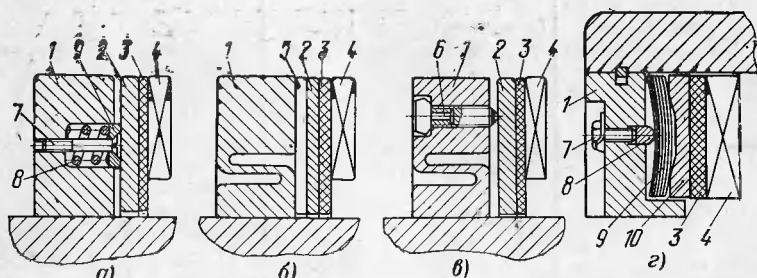


Рис. 7. Устройства для компенсации тепловых расширений обмотки ротора.

а — с винтовыми пружинами; б и в — со стальным диском; г — с наборным пружинным кольцом; 1 — центрирующее кольцо (упорное); 2 — диск; 3 — торцевая шайба; 4 — обмотка ротора; 5 — дистанционный сегмент; 6 — нажимной винт; 7 — болт; 8 — кольцо нажимное; 9 — кольцо пружинное; 10 — кольцо опорное.

Усилие нажатия на обмотку создается болтами, расположенными на торце упорного кольца равномерно по окружности. Затяжка болтов производится контролируемым моментом после насадки бандажа. Особенности конструкции роторных бандажей отечественных турбогенераторов приведены в табл. 5.

4. РАЗБОРКА И СБОРКА РОТОРНЫХ БАНДАЖЕЙ

Нагревание бандажных колец. До недавнего времени нагревание бандажных колец вели открытым пламенем. Для этого применяли ацетиленовые или керосиновые горелки. Последние получили наиболее широкое распространение. Технология нагревания керосиновыми горелками достаточно широко известна. Отметим основные особенности:

1. Вначале нагревают всю поверхность бандажного кольца, а последние 7—10 мин в основном зоны посадочных поверхностей.

2. Нагревание должно идти как можно более равномерно как по окружности, так и по длине кольца. Нельзя пламя горелки сосредоточивать на одном месте. Материал бандажных колец обладает низкой теплопроводностью и высоким коэффициентом линейного расширения. Поэтому при неподвижном положении горелки даже в течение 15—20 с металл может оплавиться или возникнуть трещины. Горелки следует непрерывно перемещать как по окружности, так и вдоль образующей.

3. Нагревание должно быть интенсивным и непрерывным и продолжаться не более 35—40 мин.

Очевидно, что применение открытого пламени не только ухудшает культуру производства, но и создает возможность повреждения бандажного кольца. Так, нагревание кольца ведется с наружной поверхности. Поэтому из-за перепада по толщине стенки создается неравномерность распределения температуры. Кроме того, нагревание кольца, в сущности, по отдельным участкам также создает неравномерность теплового состояния, причем еще в большей степени. По [Л. 1] разность температуры отдельных участков может достигать 120—150 °С. Возникающие при этом напряжения достигают опасной величины и могут вызвать деформацию кольца.

В настоящее время наиболее прогрессивным способом нагревания является индукционный, который получает все большее распространение. Индукционный способ нагревания бандажных колец разработан и внедрен впервые ЛЭО «Электросила» [Л. 2]. Создаваемый индуктором переменный магнитный поток возбуждает в кольце э. д. с., которая вызывает протекание тока по сечению кольца. Выделяющиеся при этом потери идут,

в основном, на повышение температуры кольца. Главным достоинством индукционного способа нагрева является то, что теплота выделяется непосредственно в нагреваемом теле. Основной частью установки индукционного нагрева является обмотка (далее будем называть ее индуктором), питаемая переменным током промышленной частоты. На электромашиностроительных заводах используют жесткий трубчатый индуктор, источником

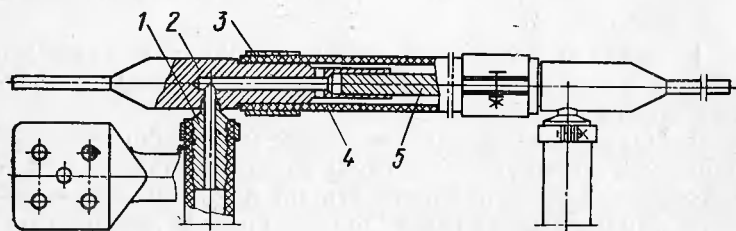


Рис. 8. Индуктор.

1 — ниппель; 2 — наконечник; 3 — хомут; 4 — водовод; 5 — токопровод.

питания которого является трансформатор мощностью 160 кВ · А напряжением 127 В.

Предприятия Главэнергоремонта применяют, в основном, так называемый гибкий индуктор, предложенный инж. П. М. Григорьевым. Конструктивно такой индуктор выполнен просто и доступен для изготовления в станционных условиях. Голый медный провод заключен в резиновый напорный рукав марки ВТ ГОСТ 8318-57

Тип турбогенератора	Число витков	Ток, А	Напряжение, В	Активная мощность, кВт
T2-25-2, ТВС-30, ТВ2-30-2, ТВФ-60-2, ТГВ-25	26 (26)	775 (750)	72 (74)	33,4 (34)
ТВФ-100-2, ТВВ-165-2	19	1 400	79	72
ТВ2-100-2, ТВВ-200-2, ТВВ-320-2	21 (21)	1 400 (1 450)	80 (78)	75,5 (76)
ТВ-50-2, ТВ-60-2	23	1 400	79	77
ТВ2-150-2, ТГВ-200, ТГВ-300	21	1 400	80,5	80
ТВВ-500-2	22	1 400	88	80

(рис. 8), который используется в качестве водовода и изоляции провода. Такой рукав может длительно работать при температуре 100 °С. Индуктор имеет наконечники для подключения к источнику напряжения и подвода охлаждающей воды. В качестве источника напряжения для питания такого индуктора используют сварочные трансформаторы ТСД-1000 и ТСД-2000. На электростанциях можно встретить индукторы длиной от 70 до 100 м с проводом сечением от 50 до 95 мм². Такие индукторы имеют низкий к. п. д., в результате чего для нагревания кольца приходится увеличивать число трансформаторов. Предприятием Уралэнергоремонт разработан и внедрен индуктор, позволяющий нагревать бандаж генераторов мощностью от 25 до 300 МВт, причем в качестве источника напряжения для нагревания бандажей генераторов Т2-25-2, ТВ2-30-2, ТГВ-25, ТВС-30 и ТВФ-60-2 используется один сварочный трансформатор ТСД-1000-4, а остальных генераторов мощностью более 50 МВт — один трансформатор ТСД-2000-3.

Сечение гибкого провода выбрано из условия минимума потерь в индукторе, по которому для получения экономического режима необходимо использовать провод сечением не менее 120 мм².

Внутренний диаметр шланга должен быть примерно в 2 раза больше диаметра провода. Так, при сечении провода 120 мм² следует использовать шланг с внутренним диаметром 25 мм.

Толщина теплоизоляции между бандажным кольцом и шлангом индуктора существенно влияет на коэффициент мощности и к. п. д. системы бандаж — индуктор.

Таблица 6

Полная мощность, кВ·А	Коэффициент мощности	Время нагревания до 250 °С, мин	Длина индуктора, м	Тип источника питания
55,5 (56)	0,6 (0,61)	45 (50)	80—85 (80)	ТСД-1000-4
111 112 (113)	0,65 0,675 (0,67)	35 50 (55)	80—85 80—85 (80)	ТСД-2000-3 ТСД-2000-3
114 114	0,675 0,675	55 60	85 85	ТСД-2000-3 ТСД-2000-3
125	0,675	60	85—90	ТСД-2000-3

Поэтому она должна быть минимальной. Оптимальная толщина теплоизоляции, как показал опыт, составляет 5 мм. Для теплоизоляции используется асбестовый картон по ГОСТ 2850-58. При нагревании бандажных колец до температуры 250 °С температура шланга в точках касания с теплоизоляцией составляет не более 100 °С, температура воды на сливе — 40—50 °С, а перепад давлений — 1,5 кгс/см².

В табл. 6 приведены расчетные параметры системы индуктор-бандажное кольцо для отечественных генераторов, а также опытные значения (в скобках) для генераторов ТВ2-30-2 и ТВ2-100-2.

Как видно из таблицы, напряжение источника питания получается равным примерно 80 В. Поэтому необходимо шунтировать обмотку реактора, включенную в цепь вторичной обмотки трансформатора, а также использовать дополнительную отпайку на первичной обмотке, дающую увеличение вторичного напряжения на 10%.

Приспособления для снятия и надевания бандажных колец обычно поставляются заводами-изготовителями. Одна из типичных конструкций представлена на рис. 9. Как видно, основными деталями приспособления являются упорный диск, нажимной диск и винтовые тяги. При снятии бандажное кольцо стягивается с посадочных поверхностей навинчиванием гаек на винтовых тягах, а при надевании надвигается на посадочные поверхности. На большинстве электростанций находятся приспособления именно такой конструкции. Эти приспособления предполагают нагревание бандажного кольца открытым пламенем.

Поэтому зазор между тягами и наружной поверхностью бандажного кольца предусмотрен небольшим — около 10—15 мм.

Очевидно, что при таком зазоре разместить индуктор непосредственно на бандаже невозможно. Иногда, чтобы использовать такое приспособление, наматывают индуктор поверх тяг. В результате при включении индуктора тяги сильно перегреваются, поглощая значительную часть мощности. При таких условиях попытки нагревания и снятия кольца будут бесполезными. Поэтому приспособления следует переделать. На упорном и нажимном дисках приваривают планки. Отверстия в планках для тяг нужно расположить на таком диаметре, чтобы

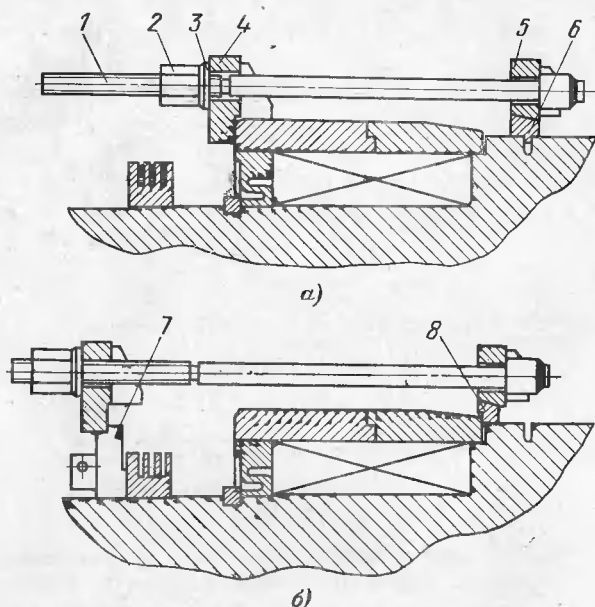


Рис. 9. Приспособление для снятия и надевания двухпосадочных бандажей

а — надевание бандажного кольца; *б* — снятие; 1 — тяга; 2 — гайка; 3 — шайба; 4 — диск нажимной; 5 — диск упорный; 6 — сегмент; 7 — кольцо; 8 — вкладыш.

зазор между тягами и поверхностью бандажного кольца составлял 90—100 мм.

Такая компоновка позволяет разместить индуктор на наружной поверхности кольца.

Удобные приспособления поставляются заводом «Электротяжмаш» (рис. 10): бандажное кольцо при снятии не стягивается, а сталкивается с посадочных поверхностей, благодаря чему создается возможность свободного размещения индуктора. Поэтому следует, если позволяет конструкция ротора, внедрять приспособления конструкции завода «Электротяжмаш». На таком приспособлении можно установить масляные домкраты, которые позволяют облегчить работы по сборке и разборке бандаж.

Разборка и сборка роторного бандаж. На современных турбогенераторах все детали бандаж имеют сборочные метки для правильной фиксации их при сборке. Если метки отсутствуют, то после разборки

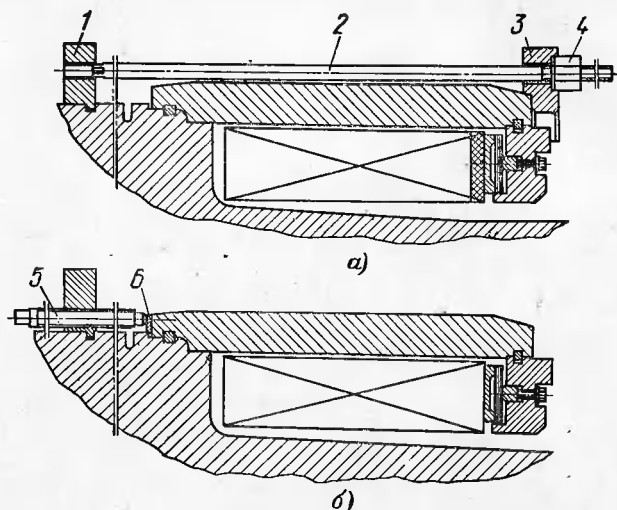


Рис. 10. Приспособление для снятия и надевания бандажей генераторов завода «Электротяжмаш».

a — надевание бандажа; *b* — снятие; 1 — диск упорный; 2 — шпилька; 3 — диск нажимной; 4 — гайка; 5 — винт; 6 — кольцо.

бандажа их следует нанести, используя следующие рекомендации:

а) На торцевой поверхности тыльной части бандажного кольца выполняют сборочную метку (рис. 11) шлифовальной машинкой, обеспечив плавные скругления и чистоту поверхности не ниже 6-го класса. Сборочную метку наносят в зоне большого зуба ротора, причем ось метки должна совпадать с осью полюса *A* (полюс *A* по заводской и ремонтной методике маркирования соединяется электрически с контактным кольцом, ближайшим к бочке ротора).

Место установки отмечают буквами *K* (сторона контактных колец или возбuditеля) и *T* (сторона турбины) теплостойкой эмалью или водным раствором медного купороса в щавелевой кислоте. Высота шрифта должна быть не менее 10 мм. Не допускается применять в качестве маркировочных знаков кернения риски или зарубины.

б) Центрирующее кольцо маркируют на наружной торцевой поверхности. Для нанесения сборочных меток

просверливают два глухих отверстия. Метки выполняют по оси полюсов на стороне, относящейся к полюсу А. Рядом выбивают соответственно букву К или Т.

Отмечают также положение бандажа относительно бочки ротора. Для этого измеряют зазор между торцовыми поверхностями бочки ротора и носика бандажного кольца. Измерение производят в четырех точках по ок-

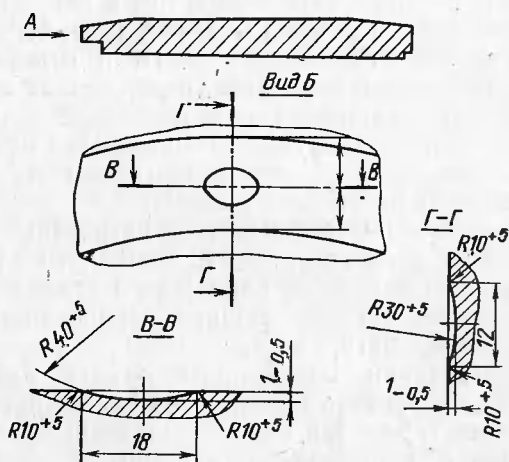


Рис. 11. Нанесение сборочных меток на бандажном кольце.

ружности (в плоскости, проходящей через ось большого зуба, и в плоскости, перпендикулярной первой). Результаты записывают в ремонтный формуляр.

Разборка бандажа вызывает необходимость снятия полумуфты и вентиляторов. На некоторых турбогенераторах необходимо также снимать и контактные кольца (например, на генераторах ТГВ-25). Разборка бандажа, в общем случае, включает в себя следующие основные операции:

- а) разборку деталей осевого крепления бандажного кольца;
- б) установку приспособлений для снятия бандажного кольца и индуктора;
- в) нагревание бандажного кольца;
- г) снятие бандажного кольца;

д) разборку деталей осевого крепления центрирующего кольца;

е) снятие центрирующего кольца;

ж) разборку составных частей бандажного кольца (если последнее составное).

Рассмотрим технологию разборки и сборки бандаж на примере генераторов серий Т2 и ТВ, где бандажное кольцо закреплено вентилятором. Центробежный вентилятор обычно центрируется выступом в заточке центрирующего кольца и крепится болтами (рис. 4). Для снятия вентилятора отвинчивают болты и отжимают его винтами. Перед снятием вентилятора следует проверить зазоры между торцовыми поверхностями вентилятора и бандажного и центрирующего колец. При правильной установке зазор между вентилятором и центрирующим кольцом должен отсутствовать.

Собирают приспособления. Если нагревание бандажного кольца ведется открытым пламенем, то для теплового контроля поверхности бандажного кольца рекомендуется использовать термощуп, разработанный предприятием Львовэнергоремонт.

При нагревании бандажного кольца индуктором удобнее контролировать температуру бандажного кольца стандартными термопарами, подсоединенными через переключатель к милливольтметру. Обычно укладывают шесть термопар — в носиковой, средней и тыльной частях кольца. Термопары крепят к бандажному кольцу стеклянной или асбестовой лентой. Укладывают теплоизоляционную прокладку и наматывают гибкий индуктор. Для облегчения намотки индуктор должен быть предварительно уложен в бухту.

При нагревании бандажного кольца ведут периодический контроль температуры бандажного кольца (с интервалом 10 мин), температуры воды на сливе из индуктора, напряжения и тока. Все результаты записывают в формуляр. Полезно также дополнительно контролировать момент освобождения бандажного кольца от натяга на центрирующее кольцо. Для этого следят за появлением зазора между поверхностями бандажного и центрирующего колец. Максимально допустимая температура нагревания бандажного кольца составляет $280 \pm 10^\circ\text{C}$. Исключение составляют бандажные кольца генераторов серий ТВ, ТВФ и ТВВ, которые допускается нагревать до температуры не более 250°C .

Когда бандаж нагреется, отключают трансформатор от сети и при помощи приспособления смещают бандажное кольцо с посадочных поверхностей на 200—300 мм, что вполне достаточно для последующего свободного снятия кольца. Для этого после разборки приспособлений и размотки индуктора на наружную поверхность кольца надевают хомут, при помощи которого стропят бандажное кольцо.

Снятое бандажное кольцо устанавливают на шпальную выкладку торцевой поверхностью.

Если нагревание бандажного кольца произведено равномерно и до необходимой температуры, что определяет полное и гарантированное освобождение бандажного кольца от натяга, то усилие, требуемое для смещения бандажного кольца, невелико.

Иногда в аномальных режимах работы турбогенератора бандажное кольцо приваривается к зубцам бочки ротора. Снять такое бандажное кольцо обычными приспособлениями трудно.

Поэтому целесообразно вначале вырезать приваренные участки. Предприятием Уралэнергоремонт при разборке приваренного бандажа генератора ТВ2-100-2 для вырезки применена воздушно-электродуговая резка. Сущность процесса воздушно-электродуговой резки заключается в том, что расплавленный электрической дугой металл выдувается из места резки сжатым воздухом. Это позволяет снизить температуру металла в зоне реза, что исключает возможность повреждения изоляции обмотки ротора.

Для резки применяют специализированный резак марки РВЭД, конструкция которого приведена на рис. 12. Сварочный провод и воздушный шланг подключают к контактной втулке 1 и закрывают изоляционной

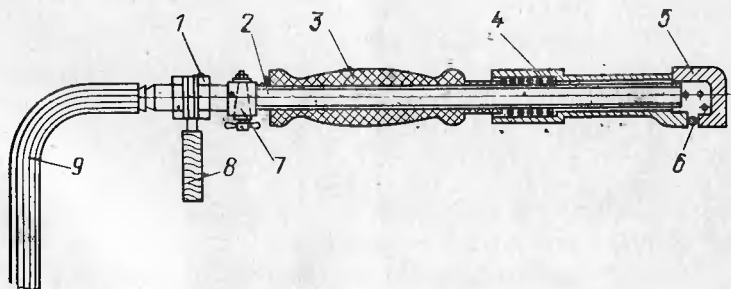


Рис. 12. Резак.

втулкой. Электрод 6 (угольный или графитированный) зажимают с помощью наконечника 4 в головке 5. Сжатый воздух подается через вентиль 7 по трубке 2 к головке 5 и через отверстия поступает в зону реза (поз. 3 на рисунке обозначена ручка). После соприкосновения электрода с бандажным кольцом подается воздух и при возбуждении дуги начинается резка. Резка производится постоянным током обратной полярности (положительная полярность — на электроде, отрицательная — на бандажном кольце) величиной 500—600 А. Режим должен быть почти короткозамкнутым (длина дуги поддерживается минимальной). Давление воздуха следует поддерживать в интервале 4—5 кгс/см². При резке ось электрода рекомендуется совмещать с направлением реза. Для того чтобы исключить попадание расплавленного металла на лобовые части обмотки, резку ведут не на полную толщину стенки кольца. Невырезанный участок толщиной 1—1,5 мм вырубает зубилом. После вырезки приваренных участков бандажное кольцо снимают обычным приспособлением.

Центрирующие кольца генераторов серий Т2 и ТВ закрепляются винтами или гайкой. При работе генератора под действием сталкивающего усилия бандаж винты, как правило, деформируются и вытягиваются, если к тому же неудачно подобран материал. Естественно, что вывернуть такие винты невозможно. Их обычно высверливают, используя для этого специальное приспособление. Гайку нагревают до температуры 100—120 °С и отвинчивают специальным ключом.

Наиболее распространенным способом нагревания центрирующего кольца является сейчас нагревание керосиновыми горелками. Обычно нагревают двумя горелками. При нагревании горелки нужно перемещать по торцовой поверхности кольца от периферии к валу так, чтобы вал нагревался незначительно. Нагревают центрирующее кольцо до температуры 220—240 °С. Не следует допускать нагревание выше 250 °С особенно эластичных колец. Очевидно, что тонкая перемычка в таких кольцах нагревается еще больше, что вызовет снижение свойств материала в наиболее напряженном месте. Когда центрирующее кольцо нагреется, его смещают с посадочной поверхности стяжными шпильками.

Если бандажное кольцо составное, то возникает необходимость в разборке его. Обычно конструкция состав-

ного бандажного кольца такова, что тыльная часть является охватываемой. Охватывающее кольцо можно определить также измерением расстояния по образующей от торца тыльной части до стыка: если это расстояние по наружной поверхности больше на 20—30 мм, чем по внутренней, то тыльная часть является охватывающей; если наоборот, то носиковая часть — охватываемая.

Для разборки бандажное кольцо устанавливают охватываемой частью на шпальной выкладке (рис. 13). На

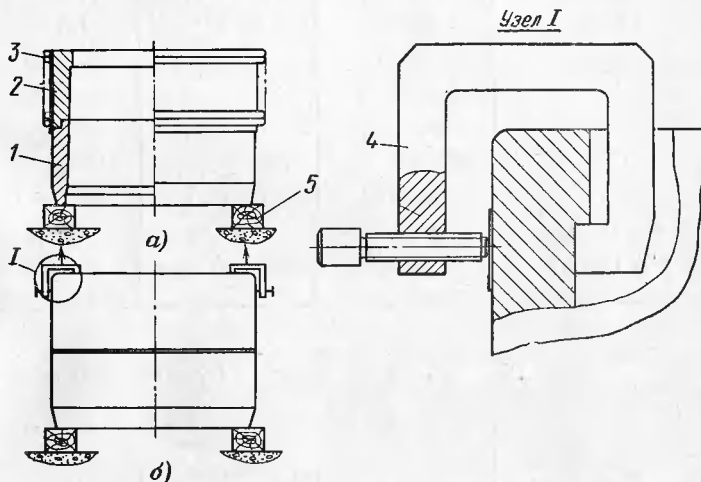


Рис. 13. Разборка составного бандажного кольца.

a — установка кольца; *б* — приспособление для разъединения; 1 — кольцо; 2 — кольцо; 3 — индуктор; 4 — трубушина; 5 — выкладка шпальная.

наружной поверхности колец наносят сопряженную маркировку — проводят по образующей в зоне стыка теплостойкой эмалью прямую линию шириной 10 мм, длиной 20—30 мм. Нагревают охватывающее кольцо индуктором до температуры 190—210 °С. Затем выводят кольцо 2 из кольца 1.

Когда кольцо 2 охладится, проверяют размеры посадочных поверхностей и теплового замка, результаты записывают в формуляр. В табл. 7 приведены размеры составного кольца и допустимые натяги в стыке (рис. 14). При сборке кольцо 2 нагревают до температуры 220—240 °С и заводят его в заточку кольца 1, совмещая между собой сборочные метки.

Таблица 7

Посадочные поверхности	Размеры сопряжения составных бандажей турбогенераторов		
	T-25-2	T2-25-2 ТВ2-30 2	T2-50-2 ТВ-50-2
b_2	20(+0,14)	20(+0,14)	20(+0,14)
b_1	20-0,14	20-0,14	20-0,14
a_2	11,9-0,12	11,9-0,12	11,9-0,12
a_1	12+0,12	12+0,12	12+0,12
$\Delta_{\text{макс}}$	0,34	0,34	0,34
d'_2	906(+0,09)	796(+0,08)	986+0,09
d'_1	906-0,055	796-0,05	986-0,055
d''_1	905,45-0,055	795,35-0,05	985,5-0,055
d''_2	905+0,09	795+0,08	985+0,08
δ'_{12} (зазор)	0—0,145	0—0,13	0—0,145
δ''_{12} (натяг)	0,3—0,45	0,22—0,35	0,35—0,5

Продолжение табл. 7

Посадочные поверхности	Размеры сопряжения составных бандажей турбогенераторов		
	ТВ-60-2	ТВ2-100-2	ТВ2-150-2
b_2	20(+0,14)	20(+0,14)	20(+0,14)
b_1	20-0,14	20-0,14	20-0,14
a_2	11,9-0,12	11,9-0,12	11,9-0,12
a_1	12+0,12	12+0,12	12+0,12
$\Delta_{\text{макс}}$	0,34	0,34	0,34
d'_2	986+0,08	996+0,09	1 075+0,1
d'_1	986-0,055	996-0,055	1 075-0,06
d''_1	985,5-0,055	995,5-0,055	1 073,5-0,06
d''_2	985+0,08	995+0,09	1 073+0,1
δ'_{12} (зазор)	0—0,145	0—0,145	0—0,16
δ''_{12} (натяг)	0,35—0,5	0,35—0,5	0,34—0,5

Сборку бандажа начинают с надевания центрирующего кольца. Нагревают кольцо горелками до температуры $230\text{--}250^\circ\text{C}$ и заводят на посадочную поверхность ротора. Обращают внимание на совпадение сборочных меток кольца и вала (допускается отклонение не более 2°).

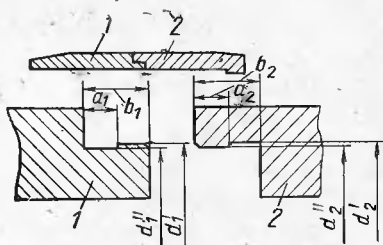


Рис. 14.

Центрирующее кольцо можно нагревать также индукционным методом. Для этого наматывают намагничивающую обмотку из шести-семи витков провода РШМ сечением $120\text{--}180\text{ мм}^2$. В качестве источника питания используют сварочный трансформатор ТСД-2000. Нагретое центрирующее кольцо после заводки на вал поджимают к буртику гайкой или закрепляют временно планками до полного охлаждения кольца.

Надевание бандажного кольца является одной из самых ответственных операций в комплексе работ по сборке ротора. Нагревание кольца ведут таким же образом, как и при разборке. Рекомендуются нагревать бандажное кольцо при сборке до $250\text{--}280^\circ\text{C}$. Контроль температуры ведут аналогично тому, как описано выше. Целесообразно также контролировать требуемое расширение кольца стальным шаблоном. Когда бандажное кольцо нагреется до требуемой температуры, шаблоном проверяют истинный диаметр носика.

С нагретого бандажного кольца снимают индуктор и надевают хомут. При помощи крана кольцо перекантуют, стропят к хомуту и заводят на вал ротора. Перед заводкой на лобовые части бандажное кольцо нужно выверить горизонтально и отцентровать в радиальном направлении. Затем с помощью крана кольцо заводят до зоны, расположенной от посадочной поверхности бочки на $100\text{--}150\text{ мм}$. В процессе движения бандажного кольца снимают крепежные хомуты. Затем надевают нажимное кольцо (упорное кольцо устанавливают ранее) приспособления (рис. 9 и 10), закручивают гайки на винтовых тягах и поджимают бандажное кольцо до упора. При этом необходимо обеспечить совпадение сборочных меток кольца и бочки ротора (допускается отклонение

не более 4°) и требуемый зазор между торцом бочки и носика кольца. Под давлением приспособления бандажное кольцо находится до полного охлаждения. При охлаждении периодически проверяют величину зазора между торцом бочки и носиком кольца и поджимают кольцо до получения нормального зазора.

Допустимая неравномерность зазора определяется конструкцией бандаж и составляет для генераторов серий ТВ, ТВ2, ТВФ, ТВВ 0,4 мм, для генераторов ТГВ-25, ТГВ-200 и ТГВ-300 0,2 мм, для генераторов серии ТВВ с консольным бандажом не более 0,1 мм.

Когда бандажное кольцо остынет, разбивают приспособления, составляют паспорт зазоров между торцом бочки и носиком кольца и измеряют сопротивление изоляции обмотки ротора мегомметром 1 000 В. Довольно часто после надевания бандажных колец сопротивление изоляции снижается до 50—300 кОм. Это вызывается испарением и конденсацией влаги в подбандажном пространстве после надевания горячего бандажного кольца и размягчением лаковых связующих из-за резкого повышения температуры. Если после охлаждения сопротивление изоляции не повышается, нужно произвести сушку изоляции ротора постоянным током.

При сборке двухпосадочного бандаж с составным бандажным кольцом необходимо учитывать возможность образования чрезмерного зазора в стыке составных частей. Рассмотрим условия возникновения раскрытия составных частей. Нагретое бандажное кольцо расширяется не только в радиальном, но и в осевом направлении. Увеличение длины кольца достигает больших значений. Так если длина бандажного кольца генератора ТВ-50-2 при нормальных условиях составляет 733 мм, то при температуре 250°C удлинение кольца составит 3 мм. После надевания бандажного кольца наиболее интенсивно охлаждаются зоны посадочных поверхностей, где кольцо отдает тепло бочке ротора и центрирующему кольцу. По мере охлаждения здесь появляется натяг и бандажное кольцо защемляется по краям. Так, для того же генератора ТВ-50-2 уже при температуре 100°C появляется натяг 0,5 мм. Если принять, что на остальных участках будет такая же температура, удлинение кольца будет составлять еще примерно 1 мм. Из-за того, что бандажное кольцо защемлено по краям, при дальнейшем охлаждении возникают усилия, растягивающие

кольцо в осевом направлении. Схема растяжения зависит от конструкции центрирующего кольца.

Пусть центрирующее кольцо — жесткое. Податливость такого кольца в осевом направлении чрезвычайно низкая. Поэтому при охлаждении бандажного кольца с момента защемления такое центрирующее кольцо не деформируется. В результате растягивается бандажное кольцо, что вызывает раскрытие составных частей. Раскрытие может достигать 1 мм, особенно если соединение составных частей ослаблено. Известно, что безопасное раскрытие стыка (при условии выполнения посадки по существующим допускам) составляет не более 0,3 мм. При более высоком раскрытии происходит смятие замка, что снижает надежность работы. Податливость эластичного центрирующего кольца в осевом направлении высокая. Поэтому при охлаждении бандажного кольца центрирующее кольцо прогибается в сторону бочки. Это предотвращает раскрытие составных частей бандажного кольца, но вызывает нежелательные изгибающие усилия в эластичном элементе центрирующего кольца.

Чтобы предотвратить это, носик кольца закрывают асбестовым полотном: при охлаждении бандажного кольца наступит защемление в первую очередь тыльной части. Таким образом, сокращение бандажного кольца будет идти в сторону центрирующего кольца, чем предотвращаются и раскрытие стыка и изгиб эластичного центрирующего кольца.

Сборка бандажа с центрирующим кольцом мембранного типа также имеет некоторые особенности. Кольца такого типа имеют самую высокую податливость в осевом направлении. Поэтому при собранном бандаже на неподвижном роторе происходит прогиб кольца под действием посадочных усилий. Это вызывает раскрытие в стыке бандажного и центрирующего колец. Наибольшая величина раскрытия составляет 0,03 мм, а глубина — 20 мм. Появление такого раскрытия неизбежно и косвенно свидетельствует о правильной сборке бандажа (с заданными натягами). При пуске генератора с увеличением скорости вращения под действием центробежных сил перемычка распрямляется и раскрытие исчезает.

Если центрирующее кольцо закрепляется гайкой, то перед сборкой целесообразно резьбу гайки и вала смазать. Смазка облегчает затяжку гайки, предохраняет резьбу от коррозии, предотвращая тем самым заедание,

что особенно важно при разборке бандаж. Смазка наносится на очищенную и обезжиренную поверхность резьбы. Наиболее стойкой смазкой считается медно-графитная, нашедшая широкое распространение для смазки крепежа турбин. Медно-графитную смазку изготавливают следующим образом: смесь, состоящую из 10—25%¹ медного порошка и 15—20% чешуйчатого графита, разбавляют глицерином (60—70% по массе). Медно-графитная смазка — теплостойкая (она сохраняет свойства до температуры 550 °С) и обладает высокой адгезией к стальным деталям.

При установке вентилятора необходимо добиться правильного положения его в заточке центрирующего кольца, т. е. вентилятор должен поджиматься болтами к торцевой поверхности центрирующего кольца. Если вентилятор прилегает к торцевой поверхности бандажного кольца, то создаются условия, снижающие работоспособность как вентилятора, так и крепежных болтов. В таком положении в диске вентилятора, нагруженном при работе центробежными силами от массы лопаток, появляются дополнительные напряжения изгиба в результате прогиба диска от затяжки болтов и от сталкивающего усилия бандажного кольца. В крепежных болтах, кроме усилий от затяжки, появляются также дополнительные напряжения изгиба от сталкивающего усилия бандажного кольца. Известны случаи обрыва крепежных болтов от перенапряжений, возникающих при таких условиях нагружения. Поэтому при надевании бандажного кольца необходимо контролировать не только величину зазора между торцевыми поверхностями бочки и кольца, но и не допускать нависания бандажного кольца над центрирующим кольцом. Правильное положение бандажного кольца обеспечивается при конструировании бандаж. Но из-за ошибок или технологических отклонений в практике возникают случаи нависания бандажного кольца. Тогда для обеспечения правильной посадки вентилятор протачивают по торцевой поверхности. Глубина торцевой проточки во избежание снижения прочности заклепок должна быть не более 1 мм. Можно также для этой цели установить стальную шайбу между вентилятором и центрирующим кольцом.

Особенности разборки и сборки бандажей отечественных генераторов. На генераторах ТГВ-25 для отжатия шпонки, закрепляющей бан-

даж, используется устройство, показанное на рис. 15. Прежде чем отжимать шпонку, определяют место ее разреза. Для этого последовательно по окружности в два соседних отверстия вставляют стальные стержни, ударяют по одному из них и по характеру вибрации другого определяют положение разреза. Отжатие начинают с отверстия, расположенного диаметрально противоположно разрезу, и затем равномерно отжимают обе части шпон-

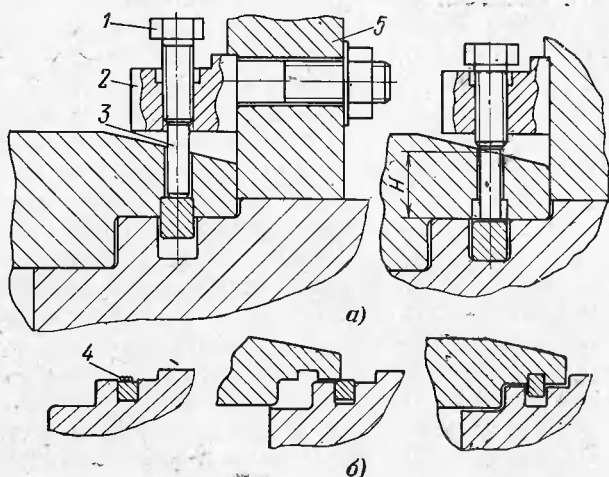


Рис. 15. Разборка и сборка бандажа генератора ТГВ-25.

а — приспособление для отжатия шпонки; *б* — схема надевания бандажа; 1 — болт; 2 — сухарь; 3 — проставка; 4 — хомут; 5 — диск.

ки. Нажимные винты рекомендуется изготовлять из стали 15Х и смазывать перед завинчиванием медно-графитной смазкой. Это предохранит винты от заеданий и деформации резьбы, особенно при нагревании бандажа керосиновыми горелками. Степень отжатия шпонки необходимо контролировать. Для этого отвинчивают один нажимной винт при зажатых остальных и измеряют расстояние Н. При полном отжатии шпонки оно равняется 22,5 мм. Можно для контроля и одновременно отжатия шпонки использовать калиброванную проставку, как показано на рис. 15. После установки винта на место последовательно проверяют степень отжатия в остальных точках. Затруднения, возникающие при отжатии шпонки, вызываються защемлением ее в канавке бандаж-

ным кольцом или пазовыми клиньями. Смещение пазовых клиньев в сторону шпонки можно определить по относительному положению рифленной поверхности клина и зубца. Такие клинья сдвигают к центру бочки до восстановления правильного положения. Для освобождения шпонки, защемленной бандажным кольцом, собирают приспособление для надевания бандаж. Затем нагревают бандажное кольцо до температуры 200—220 °С и смещают его к центру бочки. Момент освобождения шпонки определяют по характеру звука от удара по шпонке бородкой.

Если отжимать защемленную шпонку, то ее можно легко деформировать. Шпонка в этом случае принимает неправильную форму, например многогранного лепестка. Попытки снять бандаж с такой шпонкой будут неудачными. Поэтому необходимо нагретый бандаж повернуть относительно бочки на угол, равный половине угла между осями отверстий, а затем в новом положении опять отжать шпонку. При повороте бандаж стропят к стальному стержню, который вставляют в вентиляционное отверстие или в отверстие для отжатия шпонки.

Перед сборкой бандаж шпонку заводят в канавку на бочке. Шпонка должна свободно перемещаться в канавке как в осевом, так и в тангенциальном направлениях. Разрез шпонки располагают в зоне большого зуба полюса А. Шпонку стягивают вязальной проволокой. Когда нагретый бандаж надвинется на шпонку, проволоку удаляют (рис. 15, б). При конечном положении бандаж шпонка спружинивает и заходит в канавку бандажного кольца: при нажатии бородки шпонка должна свободно перемещаться в радиальном направлении.

На генераторах ТВ2-100-2 и ТВ2-150-2 пружинное кольцо закрыто. Его отжимают бородками и закрепляют в таком положении пластинками (рис. 16, б). Если кольцо отжимается трудно, тогда используется приспособление для отжатия (рис. 16, а).

Благодаря открытому расположению на генераторах серий ТВФ и ТВВ пружинное кольцо отжимается при помощи стальных клиньев (рис. 16, в). В таком положении кольцо закрепляют стальными пластинками.

При сборке торцовые поверхности упорных планок плотно подгоняют по торцовым поверхностям центрирующего кольца и паза. Если планки неправильно подогнаны, то несущая поверхность их может резко умень-

шиться. При работе из-за этого планки сминаются под действием сталкивающего усилия бандажа, что снижает надежность работы. Кроме того, выемка таких планок вызывает затруднение. При большом смятии планок зазор между болтом и отверстием планки может быть выбран, что приведет к срезу болтов.

Проверяют также перпендикулярность оси отверстия в валу относительно наружной поверхности планки. Если имеется большая неперпендикулярность, то также создаются условия, снижающие надежность работы болтов. Действительно, в таком положении болт работает на срез под действием сталкивающего усилия бандажа и составляющей центробежной силы от собственной массы планки и болта. Известны случаи отрыва упорных планок из-за среза головок болтов по этой причине.

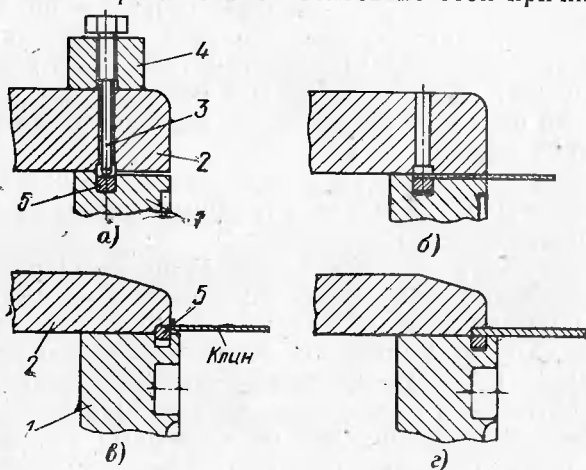


Рис. 16. Разборка бандажей генераторов ТВ2-100-2, ТВ2-150-2, серий ТВФ и ТВВ.

а — приспособление для отжатия пружинного кольца; *б* — закрепление закрытого пружинного кольца; *в* — отжатие открытого пружинного кольца; *г* — закрепление открытого кольца; *1* — кольцо центрирующее; *2* — кольцо бандажное; *3* — винт; *4* — кольцо; *5* — кольцо пружинное.

Если для распора обмотки установлены дистанционные сегменты, то их забивают при помощи слесарного молотка массой 0,4—0,6 кг. При чрезмерно плотной посадке происходит прогиб эластичного центрирующего кольца, что вызывает нагружение перемычки дополнительными статическими изгибающими напряжениями.

Для разгрузки перемычки центрирующего кольца в сегментах выполняют канавки в месте контакта сегмента с перемычкой кольца. Поэтому при сборке обращают внимание также на положение этой канавки в радиальном направлении и положение самого сегмента относительно центрирующего кольца.

Сегменты подносиковой изоляции бандажного кольца на генераторах серий ТВФ и ТВВ выполнены в виде козырьков Г-образной формы и укладываются в один слой. С учетом того, что толщина сегмента подносиковой изоляции непосредственно связана с натягом бандажного кольца на бочку ротора, при сборке производят подгонку каждого сегмента до требуемого размера. Толщина сегмента для турбогенераторов всех типов одинаковая и должна составлять 3 мм. Однако существующие допуски на изготовление изделий из пропитанной стеклоткани достигают значений, не удовлетворяющих требованиям к предельным натягам бандажного кольца. Поэтому при сборке необходимо каждый сегмент подносиковой изоляции подгонять по микрометру до размера $3 \pm 0,05$ мм.

Сборка бандажей генераторов, на которых для расхода обмотки установлены нажимные винты, имеет некоторые особенности.

При ревизии бандажей генераторов, находящихся в эксплуатации, обычно обнаруживают конусность наружной поверхности центрирующего кольца, когда оно собрано на валу. Конусность направлена к бочке ротора и достигает 0,2—0,4 мм. Причину появления конусности можно объяснить следующим образом. По технологии, принятой ЛЭО «Электросила», нажимные винты устанавливают после намотки ротора. При этом наружный диск кольца отгибается, из-за чего в перемычке возникают изгибающие усилия. Затем обмотанный ротор обрабатывают на станке и одновременно протачивают наружную поверхность кольца до чистового размера. В процессе эксплуатации генератора плотность обмотки снижается и первоначальное усилие затяжки винтов исчезает. Поэтому после разборки бандажа под действием возникающих ранее изгибающих усилий в перемычке наружный диск кольца возвращается в нормальное положение, что и выявляется измерением наружного диаметра кольца. С учетом этого рекомендуется после замены центрирующих колец сборку бандажа выполнять

следующим образом: надеть центрирующее и бандажное кольца по обычной технологии, затем после охлаждения бандажа затянуть винты до упора. Установка нажимных винтов на полностью собранном бандаже предотвращает прогиб центрирующего кольца, благодаря защемлению наружного диска бандажным кольцом.

На генераторах ТВВ-200-2, ТВВ-320-2 и ТВВ-500-2 с консольным бандажом при разборке гайку нагревают до температуры 100—120 °С. Для этого наматывают на гайку три витка обычного индуктора (длина индуктора должна быть 16—18 м), который подключают к трансформатору ТСД-2000. Нагретую гайку отвинчивают специальным ключом и отодвигают к центру бочки. Снятый с ротора бандаж устанавливают тыльной частью на

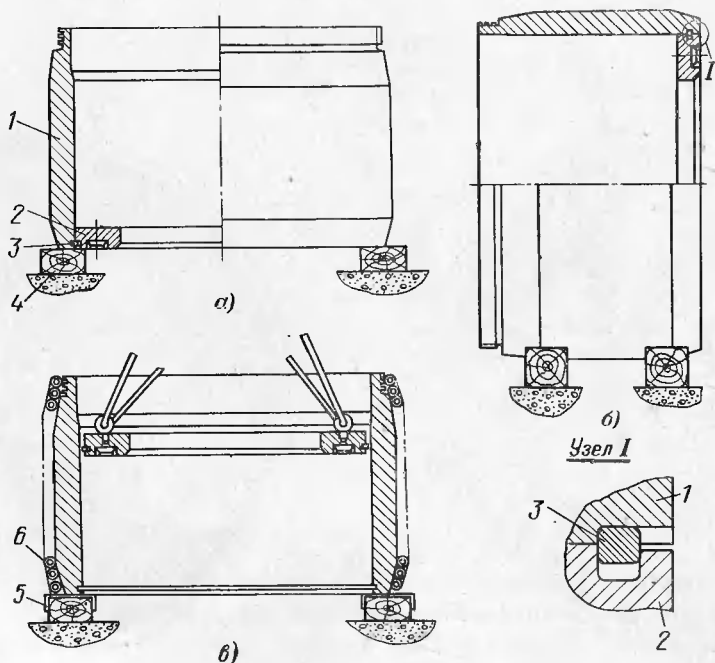


Рис. 17. Разборка и сборка консольного бандажа генераторов серии ТВВ.

а — установка снятого бандажа; *б* — установка бандажа для отжата пружинного кольца; *в* — заводка центрирующего кольца; 1 — кольцо бандажное; 2 — кольцо центрирующее; 3 — кольцо пружинное; 4 — выкладка шпальная; 5 — полотно; 6 — индуктор.

шпальной выкладке (рис. 17, а). После охлаждения бандаж перекаптовывают в положение, показанное на рис. 17, б, и отжимают пружинное кольцо, закрепляющее центрирующее кольцо. Для отжатия используют прорези в бандажном кольце. Вновь устанавливают бандаж тыльной частью на выкладке и нагревают бандажное кольцо до температуры 200—210 °С. Используя отверстия для нажимных винтов, строят центрирующее кольцо и при помощи крана выводят его из бандажного кольца.

При сборке бандажа пружинное кольцо заводят в канавку центрирующего кольца. Нагревают бандажное кольцо до температуры 200—210 °С и заводят в него центрирующее кольцо (рис. 17, в) до распора пружинного кольца в канавку бандажного кольца. Выдержав паузу 20—30 мин, бандажное кольцо нагревают до

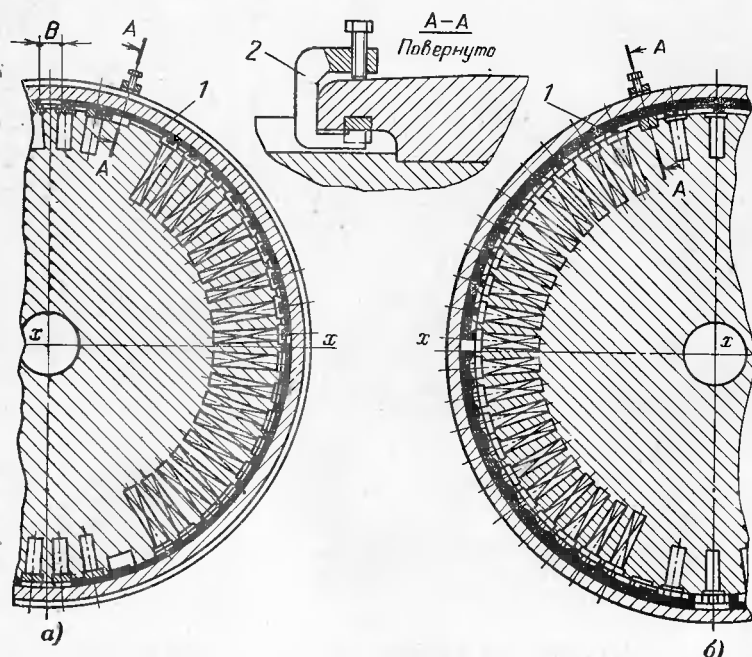


Рис. 18. Положение сегментных шпонок бандажа генераторов ТГВ-200 (а) и ТГВ-300 (б).

1 — шпонка сегментная; 2 — струбцина.

Примечание. Вверх от оси $x-x$ показано положение шпонок при снятии и надевании бандажа, вниз — положение шпонок в рабочем состоянии.

250 °С и в сборе с центрирующим кольцом заводят на место. Гайку перед завинчиванием также нагревают до температуры 100—120 °С.

На генераторах ТГВ-200 и ТГВ-300 при разборке сегментные шпонки 1 (рис. 18) необходимо сместить из рабочего положения (зацепление с зубцами бочки) так, чтобы ось каждого зубца шпонки совпадала с осью паза бочки. Для этого стопорные клинья 6, 7 (рис. 19, в) сдвигают к центру бочки до упора в пазовые клинья. Стопорные клинья закреплены винтами, которые необходимо отвинтить. Шпонки перемещают технологическими клиньями, причем шпонки, расположенные справа от оси полюсов (со стороны бочки), перемещают клиньями 11, 12, 13 (рис. 19, д), а слева от оси полюсов — клиньями 8, 9, 10. Вначале забивают клинья с максимальным скосом. Контролем полного вывода шпонок из зацепления с зубцами бочки является одновременное предельное положение двух клиньев 10 с минимальным скосом и двух клиньев 13 также с минимальным скосом. В предельном положении буртик клиньев должен упираться в торец носика бандажа. В таком положении шпонки фиксируют струбцинами (рис. 18). Технологические клинья рекомендуется изготавливать из стали 15Х и закаливать до HRC 32—40.

Если шпонки защемлены бандажом, то не следует предпринимать попытки сместить их. Необходимо, как всегда в таких случаях, нагреть бандаж и сдвинуть его при помощи приспособления на бочку ротора до получения равномерного зазора между торцом бочки и носика бандажа величиной 0,2—1,3 мм. Затем при нагретом бандаже смещают шпонки.

Перед сборкой бандажа подгоняют стопорные клинья по пазу, как показано на рис. 19, и забивают их в пазы. Укладывают сегментные шпонки в канавку на бочке ротора и проверяют боковые зазоры между шпонкой и стенкой канавки (зазор должен составлять 1—1,6 мм). Подгоняют стопорные и технологические клинья по шпонкам так, чтобы при забивании стопорных клиньев шпонки свободно входили в зацепление с зубцами ротора, а при забивании технологических клиньев — выходили из зацепления. Проверяют также положение шпонок в тангенциальном направлении.

Для этого пару смежных шпонок устанавливают в канавке бочки, чтобы ось каждого зубца шпонки сов-

падала с осью паза бочки, и в таком положении измеряют расстояние B между торцовыми поверхностями шпонок (рис. 18, а). По размеру B обрабатывают накладки шаблона для каждой пары шпонок. Устанавливают шаблон на бандажное кольцо, совмещая ось шаблона с осью сборочной метки, и укладывают в канавку кольца соответствующие шпонки (рис. 19, а).

Следует также проверить боковые зазоры между шпонкой и стенкой канавки (допустимая величина зазора составляет 0,4—0,5 мм). Шпонки закрепляют струбцинами и снимают шаблон. Сразу после надевания бандаж снимают струбины и перемещают шпонки в рабочее положение. Для этого забивают постоянные стопорные клинья до упора буртиками в торец бандажного кольца.

5. ПОВРЕЖДЕНИЕ БАНДАЖЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Коррозионное растрескивание бандажных колец. Основным недостатком аустенитной стали, применяемой для бандажных колец, является склонность к коррозии под напряжением. Коррозия под напряжением — разрушение металла, возникающее при одновременном воздействии коррозионной среды и растягивающих напряжений. Анализ многочисленных повреждений бандажных колец позволяет определить следующие характерные черты коррозионного растрескивания:

1. Трещины развиваются преимущественно на внутренней поверхности, на которой растягивающие напряжения достигают максимального значения.

2. Трещины ориентируются по образующей кольца, т. е. в направлении, перпендикулярном плоскости действия тангенциальных напряжений.

3. Образование трещин на участках, имеющих непосредственное соприкосновение с коррозионной средой. Так, обычно трещины расположены в местах стыка подбандажных сегментов, где и концентрируются коррозионные агенты.

4. Характер излома — хрупкий.

5. Отсутствие продуктов коррозионного разложения.

Повреждения бандажных колец из-за коррозионного растрескивания отмечаются, в основном, на генераторах

с водородным охлаждением. Это объясняется тем, что рабочая среда в таких генераторах содержит достаточное количество активных веществ, вызывающих коррозионное растрескивание. Характер многочисленных повреждений и проведенные исследования приводят к выводу, что незащищенное бандажное кольцо в процессе эксплуатации неизбежно подвергается коррозионному поражению. По [Л. 3] сталь 60ХЗГ8Н8В растрескивается в присутствии специфических активаторов коррозии — хлоридов, сернистого газа, сероводорода и 3%-ного раствора азотной кислоты. При этом характерно, что растрескивание стали наступает и в дистиллированной воде. Установлено также, что разрушение стали 60ХЗГ8Н8В под действием воды и 3%-ного раствора хлористого натрия при напряжении $4\,500\text{ кгс/см}^2$ и комнатной температуре наступает через 1 500—3 000 ч работы.

При эксплуатации генератора все отмеченные активаторы могут находиться в среде, окружающей роторный бандаж, как при номинальном режиме работы, так и при стоянке; причем в обоих случаях в бандажном кольце существуют растягивающие напряжения значительной величины: при работе — под действием центробежных сил и посадочных усилий от остаточного натяга, при стоянке — под действием посадочных усилий от натяга. Следует также учесть, что коррозионное растрескивание может возникать при хранении поковок бандажных колец на складе или самих колец в цеховых условиях. Известно, что из-за наклепа заготовок в кольцах возникают значительные остаточные напряжения. По сведениям некоторых исследователей [Л. 4] пороговое напряжение, при котором возбуждается коррозионное растрескивание, составляет $200\text{—}700\text{ кгс/см}^2$. Столь низкое значение критического напряжения заставляет применять специальные защитные меры по предупреждению коррозионного разрушения на всех этапах — при хранении, стоянке, монтажных, ремонтных операциях и работе генератора.

Несмотря на то, что современные генераторы, снабженные системой водородного охлаждения, рассчитаны на работу в среде чистого водорода, в условиях эксплуатации возникают ситуации, способствующие загрязнению рабочей среды. Более того, ПТЭ регламентируется чистота водорода в диапазоне 95—98%, а содержание кислорода в корпусе генератора может составлять 1,2%

(при заполнении корпуса водородом). Возможно также содержание азота до 0,5% и углекислого газа до 0,5%. При допускаемой влажности водорода 85% содержание влаги может составлять 13 г/м³. Системы водородного охлаждения включают в себя масляные уплотняющие устройства. В результате через генератор постоянно циркулирует масло, насыщенное кислородом и влагой. Из-за отсутствия маслоочистных установок в корпусе генератора из движущегося потока масла дополнительно выделяются кислород и влага. Отклонения от оптимального режима уплотнений вызывают неизбежно увеличение расхода масла в генератор и еще большее насыщение рабочей среды кислородом и влагой. В связи с этим интересна роль кислорода в развитии коррозионного растрескивания. По данным [Л. 4] коррозионное растрескивание аустенитной стали в растворе, содержащем 2% хлоридов, в отсутствие кислорода не наступает. В то же время в присутствии кислорода растрескивание наступало под тем же напряжением в растворе, содержащем всего лишь $5 \cdot 10^{-6}$ частей хлоридов. Весьма опасным является также нарушение уплотнений встроенных в корпус генератора газоохладителей, которое приводит к проникновению в рабочую среду охлаждающей воды охладителей, богатой такими активными электролитами, как хлориды и нитраты. Имеющие место при эксплуатации коронарные разряды, возникающие из-за повреждения противокоронарных покрытий, вызывают появление нитратов аммония и азотной кислоты. Поток охлаждающего газа вместе с частицами веществ — активаторов проникает в подбандажное пространство. Под действием центробежных сил эти частицы сосредотачиваются, естественно, на незащищенных участках внутренней поверхности бандажного кольца, проникая в стыки подбандажных и подносиковых сегментов и т. п. Как правило, следы коррозионного растрескивания как раз и обнаруживаются в местах расположения стыков сегментов, возле посадочной поверхности бандажного кольца на центрирующее, особенно в зоне, расположенной между углами крайних катушек. Наиболее опасным является проникновение активаторов в стыки подносиковых сегментов. Если стык этих сегментов находится на большом зубе, то в него неизбежно вместе с потоком охлаждающего газа, направляемого в вентиляционные пазы большого зуба, попадают и частицы активаторов.

Возникающий процесс коррозионного растрескивания на посадочной поверхности носика кольца может вызвать полное разрушение, если учесть, что носик кольца является наиболее напряженной частью бандаж. Наиболее характерными в этом отношении являются генераторы серий ТВФ и ТВВ, бандажные кольца которых имеют резкий переход, создающий дополнительную концентрацию напряжений.

Так, на генераторе ТВФ-60-2 из-за коррозионного растрескивания имели место разрушения бандаж и повреждение обмотки статора. Анализ причин аварии показал следующую картину развития повреждения.

За год до аварии генератор находился в капитальном ремонте со снятием бандажей. Дефектоскопия бандажных колец не выявила каких-либо дефектов. Затем при проверке ротора на продуваемость вентиляционных каналов в подбандажное пространство бандаж со стороны турбины вместе с воздухом попало большое количество воды и хлористого кальция. Характерно, что для осушки водорода на станции также применялся хлористый кальций. Очевидно, что и в процессе эксплуатации возможно попадание хлористого кальция в корпус генератора и подбандажное пространство. После ремонта через несколько месяцев эксплуатации генератор был аварийно остановлен из-за появления «земли» в обмотке статора. Сразу после выемки ротора был обнаружен откол носиковой части бандажного кольца со стороны турбины (рис. 20, а). Длина отколовшегося куска составляла 600 мм, а ширина — около 50 мм (ширина посадочной поверхности кольца равна 50 мм). На рис. 20, б отчетливо видны признаки хрупкого разрушения кольца. На внутренней поверхности отколовшегося куска обнаружено большое количество коррозионных трещин, направленных вдоль образующей кольца и раскрывшихся из-за деформации отколовшегося куска. На оставшейся части носика кольца обнаружено пять сквозных трещин, начинающихся на внутренней поверхности от переходной галтели. На внутренней поверхности кольца обнаружено также несколько коррозионных трещин, расположенных в местах стыка подбандажных сегментов.

Характерно, что отколовшийся кусок располагался, в основном, в зоне большого зуба.

Коррозионное растрескивание начинается с поражения поверхности кольца незначительными по размерам

местными язвинами, так называемыми питтингами. Обычно в начале развития питтинги визуально не выявляются. Для поиска питтингов сейчас используют электроиндуктивный метод. Далее местное поражение развивается и переходит в трещину. Так, для генераторов серии ТВВ, оснащенных системой водяного охлаждения обмотки статора, наиболее типичным дефектом бан-

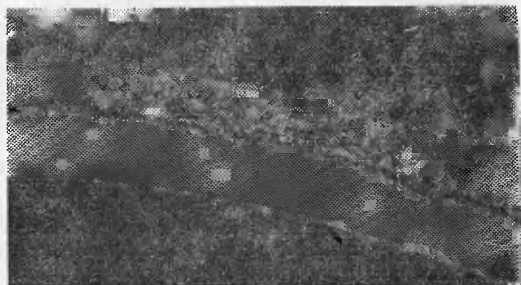


Рис. 20. Повреждение бандажного кольца от коррозионного растрескивания.

дажных колец стало появление сетки питтингов на внутренней поверхности колец, причем на этих генераторах, имеющих, естественно, из-за водяного охлаждения наи-

большую степень опасности коррозионного поражения, очаги повреждения появляются и на наружной поверхности колец.

На длительную коррозионную прочность стали влияет также качество обработки поверхности. Установлено, что более высокий класс чистоты поверхности повышает коррозионную прочность. Связано это с тем, что при резании металла создается дополнительный наклеп поверхности, причем чем грубее обработка, тем выше наклеп, а, как уже отмечалось, повышение степени наклепа усугубляет развитие коррозии под напряжением.

Наиболее эффективным способом защиты колец от коррозионного поражения является нанесение специальных покрытий на поверхности кольца. ЛЭО «Элетросила» первоначально была предложена защита кольца покрытием из кремнеорганической эмали КО-88. Однако в эксплуатации защита из этой эмали своего назначения не оправдала — эмаль выкрашивалась и отлетала от поверхности кольца. Сейчас внедряется более эффективная защита из силиконоалкидной эмали АКО-3. Характерно, что эмалью покрываются все поверхности бандажного кольца. Это очень важно. На исследованных генераторах, имеющих неполное покрытие антикоррозионной эмалью, коррозионное растрескивание обнаруживалось именно на незащищенных участках. Но не следует надеяться только на специальную защиту колец. Большое значение приобретают вопросы правильной эксплуатации генератора. Прежде всего следует принять меры по снижению коррозионной активности рабочей среды генератора. Сушку водорода целесообразнее всего производить органическими материалами — силикагелем или циацитом, а хлористый кальций исключить из использования для этой цели. Отлаженная работа уплотняющих устройств уменьшает насыщение среды такими коррозионными агентами, как влага и кислород. Это связано также с предотвращением коронарных разрядов. Известно, что для антикоронарных покрытий основным врагом является горячее масло. Поэтому актуальное значение имеет внедрение стабильных в эксплуатации маслостойких антикоронарных покрытий обмотки с тем, чтобы полностью исключить возможность коронирования обмотки. Необходимо устранить также режимы, способствующие конденсации находящейся в корпусе генератора влаги. Имеются в виду режимы внезапных остановок и пусков, при которых возникают

резкие перепады температуры бандажного кольца и окружающей среды. Следует учесть также, что водный режим газоохладителей косвенно связан с возможностью повышения влажности рабочей среды. При стоянке генератора, ремонтных операциях и хранении заготовок колец на складе необходимо создать условия, исключающие возможность появления повышенной влажности. Известен опыт зарубежных фирм по применению принудительного подогревания бандажных колец при стоянке и хранении ротора. При изготовлении новых бандажных колец следует добиваться высокого класса чистоты всех поверхностей кольца.

Несимметричная деформация бандажных колец. Современный опыт расчета бандажных колец на прочность одним из основных условий предполагает равномерность распределения нагрузки, создаваемой лобовыми частями обмотки ротора. Несмотря на некоторую условность, это допущение практически не отражается на прочности бандажного кольца. Однако неравномерное распределение лобовых частей обмотки, особенно в зоне носиковой части кольца, вызывает некоторые явления, влияющие на надежность работы бандажа. Анализируя распределение лобовых частей, можно заключить, что нагрузка на кольцо от лобовых частей изменяется как в осевом направлении, так и в тангенциальном. Пики нагрузки сосредоточены в зоне носиковой части — вдоль оси, перпендикулярной оси полюсов, в зоне тыльной части — вдоль оси, проходящей через ось полюсов.

Рассмотрим влияние несимметричной нагрузки на работу кольца независимо от симметричной. При таких условиях носик кольца нагружается двумя сосредоточенными силами, расположенными диаметрально противоположно по нейтральной оси. В поперечном сечении кольца возникает изгибающий момент, наибольшее значение которого находится в точках приложения сил.

Максимальные изгибающие напряжения находятся также в плоскости нейтральной оси и составляют около 7% основных напряжений. Но под действием несимметричной нагрузки кольцо изгибается и стремится приобрести некруглую форму с расположением наибольшего значения некруглости по нейтральной оси.

Аналогичная картина наблюдается и в тыльной части с той лишь разницей, что несимметричная нагрузка со-

средоточена здесь по оси полюсов. Из-за незначительной несимметрии нагрузки в этой части изгибающие напряжения здесь гораздо ниже, чем в носиковой части. Для оценки влияния несимметрии нагрузки наибольшее значение имеет степень деформации кольца в носиковой части, поскольку в процессе эксплуатации это явление выражается в появлении остаточной некруглости посадочной поверхности носика, причем, как следует из вышеприведенного, остаточная некруглость появляется по нейтральной оси.

На бандажных кольцах генераторов серий ТВ, ТВ2, ТВФ и ТВВ обнаруживается некруглость, достигающая в основном 0,5 мм.

Для консольных бандажей эффект несимметрии нагрузки намного ниже, чем для двухпосадочных, из-за увеличения жесткости бандажного кольца центрирующим кольцом и увеличения длины посадочной заточки бочки. Проводимые контрольные проверки бандажей генераторов ТГВ-25, ТГВ-200 и ТГВ-300, находящихся в эксплуатации, не выявляют несимметричной деформации такого значения, какого она достигает на двухпосадочных бандажах. Эффект несимметричной деформации бандажных колец двухпосадочных бандажей сам по себе не вызывает опасных повреждений, но связан с другим явлением — разрушением кольца от знакопеременных усилий.

Повреждения бандажных колец от знакопеременных нагрузок. Как отмечалось выше, знакопеременные напряжения возникают в двухпосадочном бандаже из-за прогиба ротора под действием собственных сил тяжести. Изгиб ротора вызывает в бандаже усилия, стремящиеся изогнуть бандаж в плоскости оси вала и изменить соосность посадочных поверхностей кольца и бочки ротора. Возникающие при этом напряжения носят знакопеременный характер и вызывают в двухпосадочном бандаже наиболее опасные повреждения. Изменяющееся с частотой вращения давление носика кольца на заточку бочки ротора создает наклепы на зубцах, раскалывает посадочные поверхности. Несмотря на низкий уровень, длительное воздействие знакопеременных напряжений приводит также к появлению трещин усталостного характера в зубцах бочки и носике кольца, причем, как правило, центр распространения дефектов усталостного характера находится на большом

зубе, от которого они расходятся к ближайшим малым зубцам. Объясняется это явление тем, что как мы отметили выше, по оси большого зуба из-за несимметричной деформации кольца всегда существует плотный контакт между кольцом и бочкой, в то время как по нейтральной оси при номинальной частоте вращения между кольцом и бочкой появляется зазор как из-за остаточной, так и упругой деформации. Поэтому изгибающий момент от прогиба ротора действует, в основном, по оси большого зуба ротора. Наиболее ярко дефекты такого вида проявляются на бандажах с жесткими центрирующими кольцами. Классическим примером являются генераторы Т2-25-2, ТВ2-30-2, Т2-50-2 и ТВ-50-2. На рис. 21 приведен

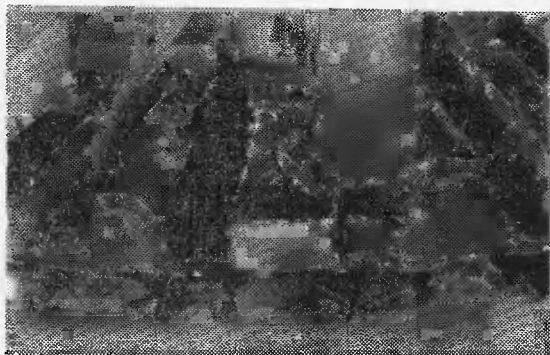


Рис. 21. Повреждение большого зуба ротора от знакопеременных нагрузок.

пример разрушения большого зуба ротора для одного из этих генераторов. После того как на генераторах ТВ-50-2 были установлены эластичные центрирующие кольца, усталостные повреждения зубцов и носика бандажного кольца прекратились. Одновременно ремонтные предприятия и заводы начали установку изоляционной прокладки на заточку бочки. Следует отметить, что по опыту эксплуатации изоляционная прокладка не только защищает торцовые зоны ротора от воздействия высоких температур, но и в определенной мере снижает знакопеременные усилия. Наиболее существенна роль изоляционной прокладки для генераторов мощностью до 30 МВт,

на которых заводы не перешли на установку эластичных центрирующих колец.

Оценку степени воздействия знакопеременного изгибающего момента на несущую способность кольца и зубцов бочки можно производить по удельному контактному давлению на посадочных поверхностях, как предлагает ЦКБЭнерго. На основании расчета находящихся в эксплуатации турбогенераторов определена безопасная величина удельного давления, составляющая 90 кгс/см. Если удельное давление составляет более 120 кгс/см, то на таких бандажах наблюдается усиленное разрушение зубцов и носика.

В табл. 8 приведены значения удельного давления для некоторых отечественных турбогенераторов с двухпосадочными бандажами.

Таблица 8

Тип турбогенератора	$M_{изг}$, кгс·см	$M'_{изг}$, кгс·см	$P_{уд}$, кгс/см
ТВ2-30-2, Т2-25-2	$1,17 \cdot 10^6$	$0,925 \cdot 10^6$	130
ТВ-50-2, Т2-50-2*	$1,71 \cdot 10^6$	$1,43 \cdot 10^6$	137
ТВ-50-2, Т2-50-2**	$1,71 \cdot 10^6$	$0,965 \cdot 10^6$	92,5
ТВФ-60-2	$1,37 \cdot 10^6$	$0,66 \cdot 10^6$	72
ТВВ-165-2	$1,96 \cdot 10^6$	$0,91 \cdot 10^6$	85
ТВВ-320-2	$3,56 \cdot 10^6$	$1,72 \cdot 10^6$	120

* Роторные бандажи с жесткими центрирующими кольцами.

** Роторные бандажи с эластичными центрирующими кольцами.

$M_{изг}$ — изгибающий момент от веса ротора; $M'_{изг}$ — изгибающий момент, передаваемый через бандаж на бочку ротора; $P_{уд}$ — удельное давление.

Анализ состояния бандажей обследованных генераторов, находящихся в эксплуатации, и расчетные результаты позволяют дать следующую характеристику по склонности некоторых генераторов к повреждениям от знакопеременных нагрузок.

Наиболее значительные повреждения происходят на генераторах Т2-50-2, ТВ-50-2 с жесткими центрирующими кольцами и Т2-25-2, ТВ2-30-2. На генераторах этих типов отмечаются повреждения зубцов бочки (наклепы, сколы) и носиковой части бандажных колец (наклепы, глубокие трещины). На генераторах с эластичными центрирующими кольцами повреждения проявляются в меньшей степени. Исключение составляют генераторы ТВВ-60-2, ТВФ-60-2 и ТВВ-320-2.

Удельные давления для генераторов ТВ-60-2 и ТВФ-60-2 незначительны. Тем не менее одним из рас-

пространенных повреждений бандажей указанных генераторов являются именно повреждения усталостного характера. Дефекты развиваются на посадочной поверхности носика кольца в зоне большого зуба. Вначале появляются незначительные трещины, затем они развиваются в более глубокие трещины, ориентированные в тангенциальном направлении на ширину большого зуба. Дальнейшее развитие трещин приводит к сквозному излому тонкого носика кольца примерно по ширине большого зуба (рис. 22). Появление трещин и изломов усталостного характера на отмеченных генераторах определяется крайне незначительными размерами носика кольца по сравнению с генераторами ТВФ-100-2, ТВВ-165-2. Так, радиальная толщина носика кольца генераторов ТВ-60-2 и ТВФ-60-2 составляет всего 18 мм, а генераторов ТВФ-100-2 (ТВВ-165-2) — 35 мм. По этой причине в носике создаются знакопеременные напряжения довольно большой величины именно в зоне большого зуба, под действием которых выносливость носика через некоторый период эксплуатации недопустимо снижается.

Удельное давление для генераторов ТВВ-320-2 достигает опасного значения

(120 кгс/см). Поэтому здесь следует ожидать появления усталостных повреждений торцевой зоны ротора. Непродолжительный опыт эксплуатации подтверждает это. Так, на нескольких обследованных генераторах обнаружены наклепы и незначительные сколы в зоне большого зуба, а также малых зубцов, прилегающих к большому

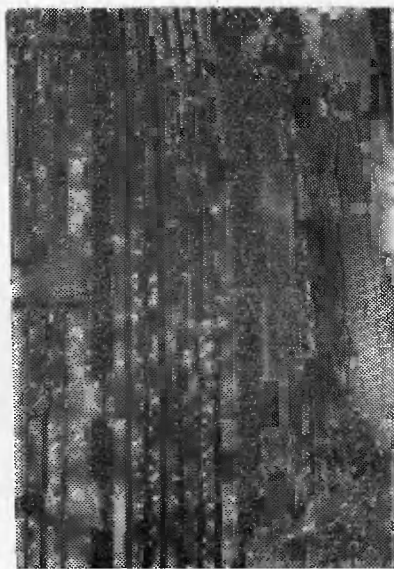


Рис. 22. Повреждение носика бандажного кольца от знакопеременных нагрузок.

зубу. Особенно опасным может быть появление сколов на малых зубцах. Сколы коронок зубцов создают возможность передачи центробежных сил от обмотки и клина на ослабленный относительно остальной части носик кольца. Такое перенапряжение носика может вызвать остаточную деформацию кольца.

Влияние знакопеременной нагрузки распространяется не только на зубцы бочки и носик бандажного кольца, но и на другие элементы торцевой зоны ротора. К этим элементам относятся стержни демпферной системы и витки обмотки. Длительное время на генераторах, имеющих демпферную систему, происходили изломы стержней на выходе из паза. Стержни таких демпферных систем укладываются непосредственно под пазовым клином, причем в зоне лобовых частей бандажное кольцо соприкасается с ними. Эти обстоятельства совершенно очевидно показали ненадежность демпферных систем такой конструкции. Поэтому отечественные заводы на генераторах, начиная с серии Т2, вообще отказались от применения демпферных систем.

Однако в связи с выпуском в последнее время высоконагруженных генераторов возникла необходимость в установке демпферных систем для защиты торцевых зон в аномальных режимах работы. Характерно, что для обеспечения надежной работы демпферных систем роторные бандажи на таких генераторах выполняются консольными.

Влияние знакопеременных нагрузок на витки обмотки проявляется гораздо в меньшей степени. Дело в том, что витки защищены от передачи изгибающего момента изоляционной прокладкой (отбортовка гильз, подбандажные сегменты). Толщина прокладки составляет не менее 6 мм. Отсутствие усталостных повреждений витков свидетельствует о том, что изоляционная прокладка толщиной 6 мм практически полностью демпфирует знакопеременные колебания носика бандажного кольца. Уменьшение толщины прокладки может вызвать повреждение верхних витков обмотки. Известны два случая усталостного разрушения верхнего витка обмотки на генераторах Т2-50-2 и ТВ-50-2, причем картина разрушения на разных генераторах аналогична.

Из-за появления «земли» в обмотке ротора генератор был остановлен и обследован. При собранных бандажах были обнаружены наплывы меди на торце носика бан-

дажного кольца и налет меди на верхних стержнях обмотки статора. После снятия бандажей было установлено, что верхний виток катушки № 2 имел оплавление по всему сечению витка в торцевой зоне, причем виток был полностью оборван. Здесь же было обнаружено, что верхний виток сплавился с последующим, благодаря чему не наступила потеря возбуждения. Характерно, что именно в пазу этой катушки толщина изоляционной прокладки на выходе из паза составляла всего лишь 1,5 мм. Такое снижение толщины прокладки привело, естественно, к тому, что витки этой катушки оказались под воздействием знакопеременных усилий. Длительность приложения нагрузки вызвала излом витка, из-за чего возникла дуга, оплавившая виток. Расплавленная медь вытекла под действием центробежных сил в зазор.

Повреждения составных бандажных колец. Большая часть находящихся в эксплуатации генераторов имеет роторные бандажные составные бандажные кольца, повреждения которых в значительной мере связаны с проявлением знакопеременных нагрузок. Отметим, что составным бандажным кольцам двухпосадочных бандажей присущи дефекты, характерные и для цельных колец. Однако эксплуатация составных колец отличается и своеобразными особенностями, вызванными наличием стыка. Здесь также отмечаются явления повышенного наклепа, расколачивания и оплавления посадочных поверхностей, появление усталостных изломов и т. п.

Проявление дефектов в зоне стыка усугубляется тремя факторами: щелевой коррозией, недопустимым раскрытием стыка и повышенной концентрацией напряжений. Известно, что все существующие конструкции составных колец двухпосадочных бандажей имеют натяг только по одной поверхности, а между остальными поверхностями в нормальном исполнении существует зазор величиной до 0,3 мм. В таких узких щелях создаются условия для возникновения щелевой коррозии [Л. 5], которая особенно интенсивно развивается на внутренних поверхностях стыка.

Появление щелевой коррозии объясняется затруднением проникновения коррозионных агентов в зазор при свободном их доступе к остальной поверхности и отсутствием отвода продуктов коррозии из зазора. Щелевая коррозия сопровождается богатым выделением продук-

гов коррозии. Обычно при осмотре стыковых поверхностей составных колец всегда обнаруживается коррозионная пыль. Протекание электрохимических реакций в щелях вызывается изменением потенциала металла в щели относительно потенциала металла на свободной поверхности. Воздействие щелевой коррозии ведет к постепенному износу контактных поверхностей стыка, что снижает плотность совместной посадки колец. Из-за ослабления натяга возрастает влияние знакопеременных нагрузок, что в свою очередь вызывает наклеп и расколачивание посадочных поверхностей, появление трещин. Трещины, как правило, развиваются от места перехода цилиндрической поверхности стыка к торцовой. В существующих конструкциях составных колец этот переход выполняется с незначительным скруглением по радиусу 1—1,5 мм, что создает повышенную концентрацию напряжений. Глубина трещин достигает недопустимых значений, из-за чего становится невозможной дальнейшая эксплуатация колец.

Наличие повышенного раскрытия стыка колец также способствует повышенному развитию дефектов в стыке. Из-за раскрытия происходит смятие контактных поверхностей. При этом удельное давление на поверхностях, имеющих натяг, возрастает. Особенно опасно раскрытие стыка на кольцах, имеющих остаточную деформацию по нейтральной оси. Из-за несимметричного изгиба такого бандажного кольца раскрытие стыка по оси большого зуба увеличивается в большей мере (по оси малых зубцов обычно раскрытие при работе исчезает). Раскрытие стыка по оси большого зуба достигает 1,2—1,5 мм.

Так, при ремонте генератора ТВ-50-2 после сборки бандажей был обнаружен зазор в стыке 1,5 мм. Через 3 года эксплуатации в очередном ремонте при обследовании бандажей было зафиксировано, что раскрытие в стыке колец составляет 0,5 мм. После разъединения составных частей на контактных поверхностях были обнаружены интенсивный наклеп, сколы замка. Оказалось также, что натяг в соединении практически отсутствует.

Отмеченные дефекты характерны для составных колец двухпосадочных бандажей, на которых явления щелевой коррозии и знакопеременного изгиба кольца протекают совместно. Составные кольца консольных бандажей обладают более высокой стойкостью к проявлению таких дефектов из-за отсутствия знакопеременных на-

грузок. Однако своеобразие конструкции консольного бандажа может способствовать появлению другого рода дефектов. Известно, что консольный бандаж генератора ТГВ-25 не имеет защиты посадочных поверхностей от протекания токов в аномальных режимах. Поэтому в таких режимах происходит повреждение не только торцевой зоны бочки ротора, но и зоны стыка составных частей бандажного кольца.

Повреждения бандажных колец в аномальных режимах работы генератора. В последнее время благодаря усовершенствованию конструкции двухпосадочного бандажа число повреждений, вызванных действием знакопеременных нагрузок, значительно сократилось. Однако сейчас возрастает роль повреждений бандажей в аномальных режимах работы генератора, к которым относятся асинхронный и несимметричный режимы, режим несимметричного короткого замыкания. Эти режимы характеризуются протеканием наведенных токов по бочке ротора, замыкающихся в торцевых зонах бочки через контактные поверхности зубцов, клиньев и бандажного кольца. В контактных участках из-за большого количества выделяемого тепла возникают высокие температуры, при которых происходит разрушение всех элементов торцевой зоны. Наиболее чувствительны к повреждениям в аномальных режимах генераторы с непосредственным охлаждением. Объясняется это тем, что, во-первых, плотность вихревых токов на этих генераторах значительно выше, чем на генераторах с косвенным охлаждением, при одинаковой степени отклонения от нормального режима, а во-вторых, тепло, выделяемое вихревыми токами, находится в зонах, не имеющих непосредственного охлаждения. По этим причинам заводы-изготовители снижают так называемую термическую устойчивость роторов с непосредственным охлаждением. Так, для генераторов серии ТВФ критерий устойчивости принят $i^2t \leq 15$, серий ТВВ и ТГВ — $i^2t \leq 8$, в то время как для генераторов с косвенным охлаждением критерий устойчивости составляет $i^2t \leq 30$.

Асинхронный режим характеризуется несоответствием частот вращения ротора и основного магнитного потока и возникает при частичной или полной потере возбуждения. Частота переменного наведенного тока равна частоте скольжения. Для двухполюсных генераторов частота вращения ротора в асинхронном режиме составля-

ёт обычно 3 030—3 100 об/мин, т. е. частота наведенных токов составляет всего лишь 0,5—1 Гц. При таких низких частотах глубина проникновения токов высокая, из-за чего в асинхронном режиме токи проникают даже в обмотку возбуждения (если она замкнута). По этой причине и величина повреждений в асинхронном режиме ниже, чем в несимметричном. Особенности асинхронного режима проявляются в снижении запаса по разъединительной частоте бандажа именно в торцевой зоне ротора. Условиями для снижения запаса являются высокие отклонения на обработку бандажных колец и разность коэффициентов линейного расширения материала бандажного кольца и бочки ротора.

На современных мощных генераторах диаметр внутренней поверхности носика кольца, как правило, превышает 1 000 мм. При существующей в электромашиностроении практике обработки колец по 2-му классу точности максимальное отклонение для таких значений составляет уже 0,1 мм. Таким образом, некруглость кольца только из-за допусков на обработку может достигать 0,1 мм. Приблизительно можно считать, что увеличение диаметра посадки кольца на 0,1 мм вызывает снижение разъединительной частоты на 100 об/мин. Общее повышение температуры торцевой зоны ротора в асинхронном режиме также способствует снижению разъединительной частоты, что объясняется разностью коэффициентов линейного расширения аустенитной ($1,7 \cdot 10^{-5} \text{ } 1^\circ\text{C}$) и турбороторной сталей ($1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } 1^\circ\text{C}$). Тонкий носик кольца нагревается быстрее, чем бочка ротора. Поэтому даже незначительный перегрев кольца может вызвать разъединение. Например, для генераторов серии ТВВ снижение разъединительной частоты до 3 000 об/мин происходит при разности перегревов бочки и кольца, равной 10°C . Эти явления приводят к общему снижению разъединительной частоты. Как отмечалось, в асинхронном режиме частота вращения ротора несколько превышает синхронную частоту вращения. Таким образом, в асинхронном режиме из-за допустимых отклонений различного рода может наступать разъединение бандажа (в нормальных условиях работы разъединительная частота для носика кольца составляет 3 200—3 300 об/мин). В местах разъединения создаются участки с низкой проводимостью, что вызывает недопустимое повышение температуры и оплавления элементов торцевой зоны.

Наибольшую опасность для торцовых зон бочки представляют несимметричный режим и режим несимметричного короткого замыкания. Несимметричный режим характеризуется различием величин токов в фазах обмотки статора и возникает при работе генератора на несимметричную нагрузку или при повреждениях в коммуникациях электрической сети. В соответствии с ПТЭ допускается длительная работа генератора при номинальной нагрузке с неравенством токов в фазах не более 10% номинального тока статора. Это соответствует току обратной последовательности 5—6% тока прямой последовательности при наибольшем фазном токе не более 105% номинального. В несимметричных режимах из-за появления поля обратной последовательности, вращающегося относительно ротора с двойной частотой, на поверхности ротора наводятся вихревые токи с частотой 100 Гц. Глубина проникновения этих токов невелика, из-за чего в несимметричных режимах возникают большие очаги повреждений, причем повреждения бандажей и бочки ротора происходят не только в аварийных несимметричных режимах, но и в допустимых. Последнее обстоятельство объясняется неравномерностью посадки бандажа на бочку и неизбежным наличием мест с плохой проводимостью. Повреждения роторных бандажей и бочки наиболее характерны для консольных бандажей и двухпосадочных бандажей, не имеющих изоляции носика от бочки.

Типичным повреждением генераторов серий Т2 и ТВ в заводском исполнении наряду с усталостными изломами от знакопеременных нагрузок являются повреждения, вызванные действием повышенных температур.

Как правило, дефекты проявляются в виде оплавления и трещин зубцов, клиньев и носика бандажного кольца. Повреждения располагаются, в основном, на малых зубцах, примыкающих к большому зубу, что связано с несимметричной деформацией кольца. Как мы отмечали, в зоне большого зуба всегда существует плотный контакт бандажа с бочкой ротора, а по оси малых зубцов из-за остаточной деформации и упругой, появляющейся при работе, возможен даже зазор. Поэтому участки с плохой проводимостью находятся в зоне, прилегающей к большому зубу. Тем не менее, термическому влиянию подвергаются и другие участки торцевой зоны благодаря высокой теплопроводности турборотор-

ной стали. Рассмотрим влияние повышенных температур на все элементы торцевой зоны бочки.

Зубцы подвергаются термическому влиянию на большую глубину; причем из-за быстрого охлаждения (после возвращения к нормальному режиму или отключения генератора) происходит обычно закалка зубцов, вызывающая значительное снижение пластических свойств и повышение твердости. В зубцах возникают также остаточные растягивающие напряжения, совместное действие которых с рабочими напряжениями может привести к появлению трещин на зубцах. Так если нормальная твердость зубцов находится в диапазоне HB 180—250, то после термического воздействия твердость повышается до HB 450—500. Кроме этого, на участках зубцов, подвергнутых воздействию температуры более 600 °C, ухудшаются магнитные свойства.

Обычно на отечественных генераторах пазовые клинья выполняются из сплава Д16Т, прочностные свойства которого резко ухудшаются при повышенных температурах. Так, предел текучести при 20 °C равен 39 кгс/мм², а при температуре 300 °C — всего лишь 14 кгс/мм². Отметим, что напряжения в клиньях при рабочей частоте вращения достигают 10 кгс/мм². Следует также учитывать, что повреждения клиньев начинаются при воздействии температур 300—350 °C, так как температура рекристаллизации алюминиевого сплава лежит в диапазоне 200—250 °C. Поэтому даже относительно невысокие температуры в торцевой зоне приводят к повреждению концевых клиньев — «вытеканию» клина из паза.

Наиболее значительный ущерб от воздействия высоких температур связан, естественно, с бандажным кольцом. Влияние высоких температур на бандажное кольцо характеризуется появлением подгаров и оплавлений носика, причем оплавления сопровождаются, как правило, появлением трещин. Это объясняется тем, что выделение тепла происходит в ограниченных участках, а аустенитная сталь чрезвычайно чувствительна к локальным перегревам из-за низкого коэффициента теплопроводности и высокого коэффициента линейного расширения. Известно, что критический интервал температур, в котором аустенитная сталь имеет минимальное удлинение, составляет 550—650 °C. Эти факторы приводят к тому, что воздействие высоких температур на бандажное кольцо неизбежно сопровождается появлением в зоне носика глу-

боких трещин. Такие повреждения выводят генератор из строя на длительное время.

На генераторе ТВ2-100-2 при переводе его с одной системы шин на другую произошла поломка траверсы масляного выключателя, в результате чего генератор находился в течение 17 мин в глубоком несимметричном режиме. Повреждение торцевой зоны было настолько значительным, что бандаж приварился к зубцам и его первоначально не удалось снять. После разборки бандажа были выявлены размеры и характер повреждения. Большой зуб и малые зубцы, прилегающие к нему, были оплавлены на глубину до 16 мм, а глубина термического влияния (закаленная зона) распространялась по крайней мере до 30 мм. При выборке металла зубцов, подвергнутых термическому влиянию, контролировалась твердость, которая в некоторых местах достигала HB 480—500. Бандажные кольца вырезались, так как их невозможно было снять.

Повреждение имел также генератор ТВФ-200-2 из-за работы в несимметричном режиме. При осмотре генератора (после снятия торцовых щитов) на крайних пакетах сердечника статора обнаружены наплывы расплавленного дюралюминия. После выемки ротора было зафиксировано вытекание клиньев из пазов. После разборки бандажей был установлен объем повреждений:

а) со стороны турбины в торцевой зоне выплавлено 11 клиньев и оплавлено 6 зубцов, со стороны контактных колец — соответственно 13 клиньев и 7 зубцов;

б) на торцевых поверхностях носиков бандажных колец выплавлено 4 канавки глубиной до 2 мм со стороны контактных колец и 7 канавок глубиной до 3,5 мм со стороны турбины, по которым протекал расплавленный дюралюминий;

в) внутренние посадочные поверхности носиковой части колец оплавлены в 14 местах на кольца стороны турбины и в 3 местах на кольца стороны контактных колец (глубина оплавлений достигала, как выяснилось при последующей выборке, 17 мм).

После ремонта оба бандажных кольца были использованы по назначению. Через некоторое время бандажное кольцо со стороны турбины было заменено, а кольцо со стороны контактных колец оставалось в эксплуатации. При осмотре бандажей через 7 лет после повреждения на бандажном кольце со стороны контактных колец была выявлена трещина, которая находилась на внутренней поверхности носиковой части. Трещина имела длину 80 мм под углом 60° к образующей цилиндра и выходила на торцовую поверхность носика на глубину 20 мм. Этот факт позволяет сделать заключение о том, что термическое влияние проявляется на работоспособности колец и с течением времени.

Значительный объем повреждений роторных бандажей генераторов ТГВ-200 наблюдается также при несимметричных режимах, причем многочисленные повреждения бандажей генераторов этой серии показывают необходимость специальной защиты торцовых зон ротора для повышения стойкости к несимметричным режимам.

Картины повреждений бандажей генераторов ТГВ-200 аналогичны описанным и приведены в [Л. 6]. Некоторые

особенности определяются консольным исполнением бандажа этих генераторов. Так, при разборке поврежденных бандажей возникают трудности в перемещении шпонок из-за того, что канавка заполняется расплавленным дюралюминием. Кроме того, как мы отмечали, бандажи этих генераторов не имеют остаточной несимметричной деформации, поэтому термическое влияние проявляется здесь практически по всей окружности. Учитывая высокую чувствительность роторов с непосредственным охлаждением к действию вихревых токов, заводы на мощных генераторах предусматривают защитные меры.

На генераторах серий ТВФ и ТВВ бандажи устанавливаются на заточку ротора через стеклотекстолитовые сегменты. Концевые клинья выполняются из хромистой бронзы марки БрХ, обладающей повышенными прочностными свойствами при высоких температурах, или из титанового сплава марки ЗВ. Обращается внимание на тщательную подгонку концевых клиньев по пазу. Зазоры по сопрягаемым поверхностям делаются минимально возможными, чтобы обеспечить надежные контакты в торцовых зонах.

Генераторы ТВВ-200-2, ТВВ-320-2 и ТВВ-500-2 с консольными бандажами имеют демпферную обмотку, защищающую торцовые зоны от действия вихревых токов. Обмотка состоит из медных гребенчатых сегментов, укладываемых в два слоя и замыкающихся под бандажом. Если учесть, что такая демпферная система удалена от поверхности, то она, к сожалению, будет воспринимать преимущественно токи низкой частоты, а поэтому защита от наиболее опасных несимметричных режимов, в которых появляются токи частотой 100 Гц, такой обмоткой недостаточно эффективна.

На генераторах ТГВ-200 и ТГВ-300 в торцовых зонах ротора проточены кольцевые канавки шириной 15 и глубиной 34 мм, которые по замыслу завода должны увеличивать сопротивление наведенным в бочке токам. Но наведенные в роторе токи, особенно токи высокой частоты, вытесняются к поверхности ротора, стремясь замкнуться возможно ближе к расточке статора, и проникают в зону бандажа. Поэтому эффективность указанных канавок, как подтверждает опыт эксплуатации, незначительна.

За рубежом ведущие турбогенераторные фирмы применяют более развитые демпферные системы раз-

личных конструкций, серебрение контактных посадочных поверхностей, торцовое прижатие бандажа и т. д.

Одинаковыми по характеру с повреждениями в несимметричных режимах являются повреждения бандажей из-за замыканий обмотки ротора на корпус в зоне лобовых частей. При двойных замыканиях обмотки возможны появление дуги в месте контакта обмотки с бандажным кольцом и оплавление внутренней поверхности.

Так, из-за снижения сопротивления изоляции обмотки ротора генератора ТВС-30 были сняты роторные бандажи. Оказалось, что сегменты подбандажной изоляции со стороны турбины имели сквозные прожоги в двух местах. На внутренней поверхности бандажного кольца имелись оплавления и три трещины глубиной до 6,5 мм. Причиной повреждения явилось разрушение подбандажных сегментов утолщенными углами верхних витков катушки № 6 полюса А.

По аналогичным причинам произошло повреждение ротора генератора ТВ-60-2. В месте прожога подбандажных сегментов витки катушек № 8 и 9 имели утолщения на углах до 3—4 мм. В этом месте на бандажном кольце, как и следовало ожидать, имелись оплавления и трещины.

Большие очаги повреждения возникают также из-за некачественных паяных швов витков в лобовых частях обмотки и деформации полувитков на роторах генераторов серии ТВФ. На генераторе ТВФ-60-2 из-за деформации полувитка возникло витковое замыкание, что вызвало оплавление витков, разрушение подбандажной изоляции и ожог бандажного кольца на площади 150×70 мм². На этой же площади распространялись и трещины, глубина которых превышала 7 мм.

Все катушки генераторов серии ТВФ имеют паяные швы в лобовых частях по оси полюсов. Иногда швы изламываются, что вызывает также оплавление внутренней поверхности бандажного кольца. Излом паяных швов, расположенных по оси полюсов, усугубляется воздействием знакопеременных нагрузок от прогиба вала при двухпосадочных бандажах.

Как отмечалось, все эти повреждения бандажных колец вызываются появлением дефектных мест в корпусной изоляции ротора. Поэтому при отыскании «земли» в обмотке следует воздерживаться от применения так называемого «прожога» изоляции, чтобы не вызвать дополнительного оплавления кольца возникающей дугой на контактных участках изоляции.

Повреждения центрирующих колец. Самым распространенным дефектом жестких центрирующих колец является ослабление посадки кольца на вал. Особенно этот дефект характерен для генераторов серий Т2 и ТВ.

Типичная картина, наблюдаемая при разборке бандажей этих генераторов, связана с появлением контакт-

ной коррозии на посадочных поверхностях и снижением натяга кольца на вал. Коррозионные процессы достигают такой степени развития, что при длительной эксплуатации натяг кольца на вал не только полностью исчезает, но и появляется зазор. Вначале ослабление посадки из-за коррозионного износа незначительно и обнаруживается при разобранном бандаже измерением диаметров кольца и вала. С течением времени процесс ослабления посадки прогрессирует и может быть выявлен на остановленной машине без разборки бандажа. Разъединение бандажа и вала из-за снятия натяга вызывает не только смещение масс и ухудшение вибрационного состояния ротора, но и снижает несущую способность центрирующего кольца и вала. Дело в том, что в этом случае изгибные колебания вала передаются не на бочку ротора, а непосредственно на центрирующее кольцо. При этом на посадочных поверхностях кольца и вала появляются наклепы, а при паличии концентраторов напряжения (например, канавок) и трещины. Например, на генераторах Т2270/98 обнаруживаются трещины, которые развиваются от дна шпоночной канавки на посадочной поверхности вала.

Ранее на всех отечественных генераторах выполнялась фиксация центрирующего кольца в тангенциальном направлении.

С этой целью на валу устанавливался цилиндрический штифт, а на внутренней поверхности кольца выполнялся соответственно паз прямоугольного сечения. Как показал опыт эксплуатации, часто от углов этого паза начинали развиваться трещины. На современных генераторах заводы отказались от фиксации центрирующего кольца в тангенциальном направлении.

Следует отметить, что явление ослабления посадки на вал присуще и эластичным центрирующим кольцам. Наиболее рациональным решением проблемы предотвращения этого процесса является нанесение антикоррозионных покрытий по внутренней поверхности кольца.

Наиболее значительным повреждением центрирующих колец является разрушение перемычки в Z-образных кольцах генераторов ЛЭО «Электросила». Впервые эластичные кольца были установлены на генераторах ТВ2-100-2 в 1952 г., причем дистанционные сегменты, устанавливаемые для распора лобовых частей обмотки, изготавливались из стали марки Ст. 3 без разгружающих

канавок. Толщина тороидальной части перемычки составляла 10 мм. Через небольшой промежуток эксплуатации начали появляться дефекты, переходящие в полное разрушение кольца. Сквозные трещины на перемычке стали обычным явлением после нескольких лет эксплуатации эластичных колец. Было установлено, что в местах контакта стальных сегментов с торцевой поверхностью кольца проявляется пагубное воздействие контактной коррозии. Коррозионный износ достигал больших значений.

Глубина сплошного изъязвления составляла 0,3—0,5 мм, причем контур изъязвления точно соответствует контуру сегмента. Считалось, что трещины начинают развитие с тороидальной части перемычки, пораженной коррозией.

Поэтому стальные сегменты по решению ЛЭО «Электросила» были заменены на дюралевые, а в месте контакта сегмента с перемычкой начали выполнять разгружающую канавку на сегменте. Одновременно была увеличена толщина тороидальной части перемычки до 12 мм, а цилиндрической — до 10 мм.

Несмотря на это, повреждения эластичных колец не были приостановлены и продолжают проявляться. Характер повреждения кольца, независимо от типа генератора, почти идентичен. Трещины, как правило, начинаются с тороидальной части перемычки в месте контакта с дистанционными сегментами. Затем трещина развивается в радиальном и тангенциальном направлениях до соединения с аналогичной трещиной, развиваемой от другого сегмента. При этом вибрационное состояние ротора резко ухудшается.

Замена стальных сегментов на дюралевые не дала каких-либо положительных результатов: в зоне контакта сегментов по-прежнему наблюдаются следы обильной коррозии, наклепов и даже оплавлений, что создает, конечно, потенциальный очаг повреждений. В последнее время ремонтные предприятия при ремонте бандажей устанавливают вместо дюралевых сегментов стеклотекстолитовые. Однако повреждения центрирующих колец не прекращаются.

Так, при ремонте бандажа генератора ТВ-60-2 в 1967 г. дюралевые сегменты были заменены на стеклотекстолитовые. В 1969 г. при очередном капитальном ремонте на обоих центрирующих кольцах были обнаружены трещины на перемычке.

Радикальным улучшением конструкции этого узла является установка для распора обмотки нажимных винтов, предотвращающих развитие коррозии на перемычке. Однако развитие коррозии не является единственным фактором, влияющим на длительную прочность эластичного центрирующего кольца.

Известно, что перемычка — наиболее напряженная часть кольца как при статических, так и динамических нагрузках.

На остановленном турбогенераторе в перемычке возникают статические растягивающие напряжения от посадочных усилий по внутренней поверхности кольца, причем наибольшего значения напряжения достигают на тороидальных частях перемычки, где они приближаются к пределу текучести. Так, для генератора ТВВ-165-2 напряжения в отмеченных точках при стоянке составляют 5 010 и 4 920 кгс/см², а предел текучести материала равен 7 000 кгс/см². На остановленном турбогенераторе перемычка сжимается посадочными усилиями, действующими по наружной поверхности кольца. При повышении частоты вращения под действием центробежных сил диаметр кольца увеличивается и перемычка выпрямляется, благодаря чему статические напряжения снижаются.

Большую опасность представляют знакопеременные напряжения в перемычке, возникающие из-за изгиба вала при вращении ротора. Величина их до 300—450 кгс/см². Совместное воздействие знакопеременных напряжений, растягивающих напряжений и коррозионных процессов и создает условия, снижающие работоспособность эластичных колец, что подтверждается усталостным характером трещин. Так, при исследовании разрушенного центрирующего кольца генератора ТВФ-200-2 выявлено сквозное проникновение трещин. Излом кольца в месте сквозной трещины (рис. 23) притерт с наличием большого количества концентрических дуг, что является одним из признаков усталостного излома. При микроисследовании обнаружены микротрещины (рис. 23), расположенные по обе стороны от излома. Характер микротрещин — транскристаллитный и соответствует усталостному происхождению. Несомненно, что большое значение для ускорения старения перемычки кольца имеет также состояние поверхности. Очевидно, что все поверхности перемычки должны иметь как можно более высокий класс чистоты (требованиями чертежа на скруглениях

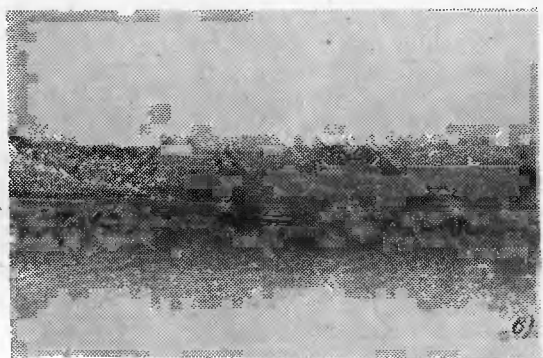
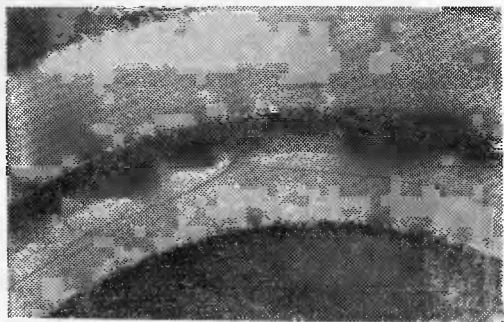


Рис. 23. Разрушение эластичного Z-образного центрирующего кольца.

a — типичное повреждение кольца; *б* — излом кольца в месте сквозной трещины; *в* — характерное расположение микротрещин.

перемычки задан 7-й класс чистоты). Сложная конфигурация кольца создает большие затруднения в получении требуемого класса чистоты. Особенно это проявляется при изготовлении колец в станционных условиях, где из-за отсутствия надлежащего оборудования практически невозможно обеспечить 7-й класс чистоты. При этом в наиболее напряженной части кольца создается дополнительный наклеп и концентрация напряжений из-за повышенной шероховатости.

6. РЕМОНТ БАНДАЖЕЙ

Осмотр и измерения. В период капитального ремонта турбогенератора с выемкой ротора бандажи подлежат обязательному профилактическому осмотру. Если снятие бандажей не предусмотрено, то осматривают наружные поверхности бандажного и центрирующего кольца на отсутствие трещин, подплавлений, ожогов. Осмотр производят после чистки поверхностей ацетоном. Особенно тщательно осматривают поверхности в зоне торца носика бандажа, в зоне вентиляционных отверстий, в зоне замкового соединения составных бандажей, а также эластичные элементы центрирующих колец. Осмотр производят пользуясь лупой 10-кратного увеличения. Осматривают детали крепления бандажного и центрирующего кольца от осевого смещения. При осмотре обращают внимание на сопряжение центрирующего кольца и вала ротора, а также бандажа и центрирующего кольца. Появление контактной коррозии в указанных местах может свидетельствовать об ослаблении натягов.

Если при осмотре до снятия бандажей были обнаружены дефекты, то бандажи необходимо снять. На снятых бандажах дополнительно осматривают все посадочные места и внутренние поверхности бандажных и центрирующих колец. Осмотр производят после чистки бандажей ацетоном. При осмотре составляют карту дефектов.

Затем определяют натяги деталей бандажа, для чего измеряют диаметры посадочных поверхностей (рис. 24) по четырем осям и заносят их в формуляр. Измерения диаметров внутренних поверхностей производят микрометрическим нутромером, а измерения диаметров наружных поверхностей — микрометрической скобой. Для исключения ошибок при определении натягов нутромер

проверяют по скобе. Полученные измерениями величины натягов сравнивают с требуемыми (табл. 9).

Если при осмотре обнаружатся какие-либо дефекты замкового соединения составного бандажного кольца, то его разбирают, осматривают посадочные поверхности и измеряют натяги.

После осмотра и измерений производят дефектоскопию поверхностей бандажных колец цветным или электроиндуктивным методом. Электроиндуктивный контроль применяется только для бандажных колец, изготовленных из немагнитной стали. Цветной метод может применяться для бандажных колец, изготовленных как из магнитной стали, так и из немагнитной стали. При дефектоскопии немагнитных бандажных колец предпочтение следует отдать электроиндуктивному методу, который обладает высокой чувствительностью к поверхностным дефектам, позволяет выявлять мелкие трещины и питтинги коррозионного происхождения, которые не могут быть выявлены цветной дефектоскопией. Если же в результате осмотра обнаружены подгары, оплавления или наклепы, то прежде зачищают эти места шлифмашинкой, оснащенной мелкозернистым камнем, на глубину до 0,2 мм, а затем выполняют дефектоскопию. Это вызвано тем, что, как правило, под оплавлениями, подгарами и наклепами имеются трещины, которые без зачистки не обнаруживаются дефектоскопией.

Дефектоскопия поверхностей эластичных элементов центрирующих колец, посадочных поверхностей центрирующих колец, а также посадочных поверхностей на валу и бочке ротора выполняется цветным или магнитно-порошковым методом.

Дефектоскопия электроиндуктивным методом [Л. 7] основана на измерении вихревых токов, возникающих в поверхностном слое контролируемой детали, при воздействии на него переменного электромагнитного поля. Трещины на поверхности вызывают уменьшение электропроводности поверхностного слоя металла, что оказывает влияние на величину вихревых токов. Поле создается катушкой датчика, которая одновременно является элементом, воспринимающим изменение электромагнитного поля в контролируемом поверхностном слое металла.

Контроль бандажных колец электроиндуктивным методом осуществляется с применением дефектоскопов ДНМ-500, ДНМ-200 или ППД-1, которые позволяют выявить трещины длиной более 1 мм, глубиной более 0,15 мм, а также скопления трещин протяженностью 0,1—0,3 мм.

Отмеченные при контроле участки с подозрением на наличие трещин подвергаются травлению реактивом «Царская водка» и

Тип турбо-генератора	Размеры и натяги деталей					
	Бандажное кольцо — бочка				Бандажное кольцо	
	d_p	$\delta_{из}$	$d_{бр}$	Натяг	d_k	
T2270/98*	864 _{-0,055}	2,5	867,9 _{+0,09}	1,6—1,455	851 _{-0,055}	
T-25-2*	862,7 _{-0,055}	2,5	866 _{+0,09}	1,7—1,555	836,7 _{-0,055}	
T2-25-2*	758 _{-0,05}	2,5	761,8 _{+0,08}	1,2—1,07	739,3 _{-0,05}	
TB2-30-2*	758 _{-0,05}	2,5	761,8 _{+0,08}	1,2—1,07	739,3 _{-0,05}	
T2-50-2*	918 _{-0,055}	2,5	921,6 _{+0,09}	1,9—1,755	901,6 _{-0,055}	
TB-50-2*	918 _{-0,055}	2,5	921,6 _{+0,09}	1,9—1,755	901,6 _{-0,055}	
TB-60-2*	918 _{-0,055}	2,5	921,1 _{+0,09}	1,9—1,755	901,6 _{-0,055}	
TB2-100-2*	930 _{-0,055}	2,5	933,2 _{+0,09}	1,8—1,655	922 _{-0,055}	
TB2-150-2*	1002 _{-0,06}	2,5	1005 _{+0,1}	2—1,84	995,8 _{-0,055}	
TB-60-2	971,4 _{-0,055}	3	976 _{+0,09}	1,4—1,255	901,6 _{-0,055}	
TB2-100-2	981,4 _{-0,055}	3	986 _{+0,09}	1,4—1,255	922 _{-0,055}	
TBФ-60-2	910 _{-0,055}	3	914,5 _{+0,09}	1,5—1,355	855,5 _{-0,055}	
TBФ-100-2	974 _{-0,055}	3	978,2 _{+0,09}	1,8—1,655	924,5 _{-0,055}	
TBB-165-2	974 _{-0,055}	3	978,2 _{+0,09}	1,8—1,655	924,5 _{-0,055}	
TBФ-200-2	1044,8 _{-0,06}	2,9	1048,5 _{+0,1}	2,1—1,94	994,6 _{-0,055}	
TBB-200-2	1045 _{-0,06}	3	1048,8 _{+0,1}	2,2—2,04	998,7 _{-0,055}	
TBB-320-2	1045 _{-0,06}	3	1048,6 _{+0,1}	2,4—2,24	998,9 _{-0,055}	
T4376/142	Однопосадочный бандаж				1261,8 _{-0,065}	
TBC-30					744,1 _{-0,05}	

* Размеры и натяги приведены для бандажей, реконструированных под посадку на

Тип турбо-генератора	Размеры и натяги				
	Бандажное кольцо — бочка				
	d'_p	$d'_{бр}$	Натяг	d''_p	
TBB-200-2	1019 _{-0,06}	1016,8 _{+0,1}	2,2—2,04	1018,6 _{-0,06}	
TBB-320-2	1019 _{-0,06}	1016 _{+0,1}	2,4—2,24	1018,6 _{-0,06}	
TBB-500-2	1070 _{-0,06}	1067,6 _{+0,1}	2,4—2,24	1069,6 _{-0,06}	
TГВ-25	798 _{-0,05}	796,8 _{+0,08}	1,2—1,07	758 _{-0,05}	
TГВ-200	1056,8 _{-0,06}	1055 _{+0,1}	1,8—1,64	1009 _{-0,06}	
TГВ-300	1098,8 _{-0,06}	1097 _{+0,1}	1,8—1,64	1048 _{-0,06}	
TГВ-500	1103 _{-0,06}	1101 _{+0,1}	2—1,84	1056,2 _{-0,06}	

рооторного бандаж, мм (рис. 24)

цо — центрирующее кольцо		Центрирующее кольцо — вал		
$d_{\text{БК}}$	Натяг	$d_{\text{в}}$	$d_{\text{КВ}}$	Натяг
849,5+0,09	1,5—1,355	580,5-0,045	580+0,07	0,5—0,385
835+0,09	1,7—1,555	530,6-0,045	530+0,07	0,6—0,485
738+0,08	1,3—1,17	455,45-0,04	455+0,06	0,45—0,35
738+0,08	1,3—1,17	455,45-0,04	455+0,06	0,45—0,35
900+0,09	1,6—1,455	555,5-0,045	554,8+0,07	0,7—0,585
900+0,09	1,6—1,455	555-0,045	554,8+0,07	0,7—0,585
900+0,09	1,6—1,455	575,7-0,045	575+0,07	0,7—0,585
920,4+0,09	1,6—1,455	620-0,045	619,3+0,07	0,7—0,585
994+0,09	1,8—1,655	695,7-0,05	695+0,08	0,7—0,57
900+0,09	1,6—1,455	575,7-0,045	575+0,07	0,7—0,585
920,4+0,09	1,6—1,455	620-0,045	519,3+0,07	0,7—0,585
854+0,09	1,5—1,355	530,5-0,045	529,8+0,07	0,7—0,585
923+0,09	1,5—1,355	595,7-0,045	595+0,07	0,7—0,585
923+0,09	1,5—1,355	595,7-0,045	595+0,07	0,7—0,585
992,9+0,09	1,7—1,555	678-0,05	677,3+0,08	0,7—0,57
996,8+0,09	1,9—1,755	675,7-0,05	675+0,08	0,7—0,57
996,8+0,09	2,1—1,955	675,7-0,05	675+0,08	0,7—0,57
1260+0,11	1,8—1,625	865,6-0,055	865+0,09	0,6—0,455
743+0,08	1,1—0,97	455,45-0,04	455+0,06	0,45—0,385

изоляция от бочки ротора.

Таблица 9б

деталей роторного бандаж, мм (рис. 5)

		Бандажное кольцо — центрирующее кольцо		
$d''_{\text{БР}}$	Натяг	$d_{\text{к}}$	$d_{\text{БК}}$	Натяг
1016,8+0,1	1,8—1,64	999,1-0,055	997+0,09	2,1—1,955
1016,8+0,1	2—1,84	999,2-0,055	997+0,09	2,2—2,055
1067,6+0,1	2—1,84	1047,4-0,06	1045+0,1	2,4—2,24
756,7+0,08	1,3—1,17	756,2-0,05	755+0,08	1,2—1,07
1007+0,1	2—1,84	1001,6-0,06	1000+0,1	1,6—1,44
1046+0,1	2—1,84	1061,6-0,06	1060+0,1	1,6—1,44
1054+0,1	2,2—2,04	1061,6-0,08	1060+0,1	1,6—1,44

осмотру с применением металлографического микроскопа ММУ-1 или лупы МИР-2. Следует помнить, что травление реактивом «Царская водка» так же, как и электроиндуктивный контроль, производится только на бандажных кольцах, изготовленных из немагнитной стали. Травление выполняют следующим образом: поверхность, подлежащую травлению, после зачистки обезжиривают бензином и спиртом, затем на поверхность накладывают тампон, смоченный в реактиве. Посадочную поверхность протравливают участками длиной 300—400 мм. При травлении тампон следует постоянно перемещать во избежание образования под ним газовой прослойки, резко снижающей эффективность травления. При травлении необходимо следить за тем, чтобы реактив не растекался на участки поверхности, не подлежащие травлению. Длительность травления реактивом «Царская водка» до 5 мин. После травления поверхность промывают 10%-ным раствором кальцинированной соды, а затем теплой водой.

Травление центрирующих и магнитных бандажных колец производится в два приема: сначала раствором персульфата аммония в дистиллированной воде (100 г аммония на 900 г воды) в течение 15 мин, затем раствором азотной кислоты в этиловом спирте (3 см³ кислоты на 100 см³ спирта) в течение 2 мин.

Дефектоскопия цветным методом. Сущность метода заключается в следующем: при нанесении на поверхность металла специальной жидкой смеси красного цвета, обладающей хорошей смачиваемостью, часть смеси проникает в имеющиеся на по-

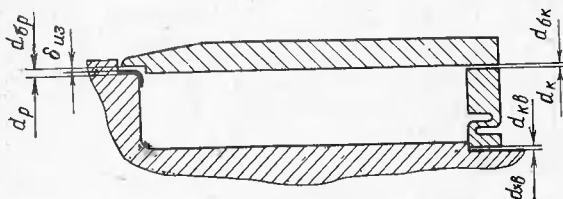


Рис. 24. Обозначения посадочных диаметров бандажного и центрирующего колец, бочки и вала ротора для заполнения формуляра.

верхности трещины и поры. Если затем цветную смесь удалить и нанести на поверхность белую краску, то последняя впитывает в себя оставшуюся в трещинах и порах красную смесь, образуя цветной рисунок, по которому можно судить о наличии и характере дефектов. В качестве красного красителя применяется темно-красный жирорастворимый краситель «Судан IV».

Поверхность, подлежащую контролю, обезжиривают ацетоном и протирают насухо ветошью. На подготовленную поверхность наносят краску мягкой волосистой кистью в два-три слоя, не давая высохнуть ранее нанесенным слоям. Сразу же после нанесения последнего слоя красную краску смывают ветошью, смоченной масляно-керосиновой смесью (керосин 30%, масло трансформаторное 70%), и протирают поверхность сухой ветошью. Затем наносят белую краску. Краску наносят тонким ровным слоем краскораспылителем.

К осмотру поверхности приступают через 5 мин после нанесения белой краски. Появление красных прожилок свидетельствует о наличии трещин. На участках поверхности, где получены нечеткие результаты, контроль повторяют.

Устранение дефектов носика двухпосадочного бандаж. Дефекты посадки бандаж-бочка весьма частое явление на двухпосадочных бандажах, не имеющих изоляции от бочки ротора. Основными причинами появления трещин являются наклепы и ожоги металла на посадочных поверхностях.

Одним из самых эффективных и наименее трудоемких мероприятий по устранению дефектов, связанных с ожогами металла и наклепами, является посадка носика бандаж на изолирующую эластичную прокладку.

Главным техническим управлением Министерства энергетики и электрификации СССР рекомендовано при ремонтах с выемкой роторов на всех турбогенераторах мощностью 50 МВт и более с двухпосадочными бандажами устанавливать изолирующую прокладку между носиком бандаж и бочкой ротора.

При ремонтах роторов со снятием бандажей установку изоляционной прокладки следует считать обязательной независимо от мощности турбогенератора и наличия повреждений посадочных мест.

Для установки изоляционной прокладки носик бандажного кольца растачивают на глубину 2,5—3 мм на длине 40—45 мм с конусным переходом 35 мм на основную поверхность (рис. 25). Обработку выполняют на карусельном или токарном станке, применяя резцы с твердосплавными пластинками марок Т30К4, Т15К6 или Т5К10. В процессе проточки удаляются подгары, оплавления и мелкие трещины. Если дефекты распространяются на торцовую часть носика, то бандаж следует проторцевать на глубину 1—3 мм, выдержав радиусные переходы. При обработке необходимо следить за стружкой; излом стружки в одном и том же месте свидетельствует о наличии невыбранной трещины. После проточки обработанные поверхности шлифуют мелкозернистой шкуркой до получения чистоты поверхности не ниже класса 6.

После обработки производят повторный электроиндуктивный контроль с последующим травлением поверх-



Рис. 25. Обработка носика бандажного кольца для установки изоляционной прокладки.

ности реактивом «Царская водка» и осмотром с применением металлографического микроскопа ММУ-1 или лупы МИР-2. Если на обработанной поверхности обнаружены отдельные трещины, то их устраняют местной выборкой. Выборку металла производят быстроходной пневматической машинкой, оснащенной шлифовальным камнем средней зернистости диаметром около 60 мм. После зачистки шлифкамнем местную выборку шлифуют мелкозернистой шкуркой до получения чистоты поверхности класса 7. Выборка должна иметь плавные переходы на основную поверхность. Сначала делают неглубокую выборку (глубиной до 1 мм) и тщательно осматривают ее, пользуясь лупой. При необходимости поверхность выборки подвергают травлению. Если же в первый прием зачистки дефект не устранен, выборку углубляют до полного удаления трещин. Углубление выборки делают в несколько приемов, осматривая поверхность через лупу. Допустимые размеры выборки определяются в каждом случае индивидуально в зависимости от запаса прочности бандажного кольца, заложенного при конструировании, и его состояния. В эксплуатации находится большое число генераторов с местными выборками глубиной до 3 мм на посадочной поверхности носика, расточенного под посадку на изоляцию (общая глубина выборки и проточки составляет 5 мм).

Если же проточкой и местными выборками не удастся устранить дефекты на посадочной поверхности носика бандажного кольца и если оставшиеся после проточки дефекты расположены не далее чем на 25—30 мм от торца, то бандаж можно укоротить на эту длину и расточить внутреннюю поверхность для посадки его на бочку ротора через изоляционную прокладку. В результате отрезки носика уменьшается длина посадочного места на центрирующее кольцо. Образовавшееся свободное место заполняют посадкой специально изготовленного кольца. Кольцо можно изготовить из поковки магнитной стали, например из поковки центрирующих колец. Допустимость применения поковки должна быть проверена механическим расчетом.

Имеется опыт применения такого способа ремонта двухпосадочных бандажей турбогенераторов 30—50 МВт. Ниже приводится пример ремонта роторного бандажа турбогенератора ТВ2-30-2 с отрезкой носиковой части бандажного кольца на 25 мм.

После снятия бандажа на посадочной поверхности носика в зоне большого зуба были обнаружены следы оплавления. При проточке бандажного кольца под изоляционную прокладку по излому стружки было обнаружено несколько трещин, расположенных в местах оплавлений. Расточкой поверхности на глубину 2,5 мм и местной выборкой на глубину 2,5 мм не удалось вывести обнаруженные трещины. Бы-

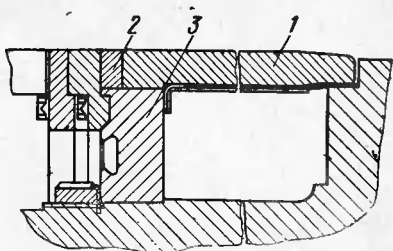


Рис. 26. Ремонт бандажного кольца турбогенератора ТВ2-30-2 путем отрезки носиковой части и установки специального кольца на центрирующее кольцо.

1 — укороченное бандажное кольцо;
2 — дополнительное кольцо; 3 — центрирующее кольцо.

ло принято решение проторцевать носик бандажного кольца на 25 мм и сместить бандажное кольцо в сторону бочки ротора, а образовавшееся свободное место на центрирующем кольце заполнить специально изготовленным дополнительным кольцом (рис. 26). Бандажное кольцо обработано на станке. В результате обработки трещины были удалены полностью. Для увеличения посадочной поверхности бандажа на центрирующее кольцо упорный буртик на центрирующем кольце был проточен. Дополнительное кольцо изготовлено из поковки центрирующего кольца турбогенератора ТВ-50-2 (сталь 34ХН1М). Натяг кольца определен расчетом и составил 0,5 мм. Поскольку центрирующее кольцо не имело упорного буртика, сборка бандажа производилась в такой последовательности: после надевания бандажного кольца установили дополнительное кольцо, а затем бандажное кольцо и дополнительное кольцо сдвинули до упора в технологические планки, закрепленные на центрирующем кольце в отверстиях для крепления вентилятора.

Имеется опыт ремонта двухпосадочных бандажей заменой носиковой части бандажа кольцом, изготовленным из немагнитной стали с соответствующими механическими свойствами. Для этой цели отрезают носик бандажа, изготавливают кольцо и собирают его с бандажом в тепловой замок (см. табл. 7).

Ремонт носиковой части бандажей, имеющих посадку ротора через изолирующие

сегменты (генераторы ТВ-60-2 и генераторы серий ТВФ и ТВВ). В связи с тем, что бандажи этих генераторов имеют сравнительно тонкую носиковую часть, возможности ремонта таких бандажей весьма ограничены. При обнаружении язвин и наклепов на посадочной поверхности производят местную зачистку на глубину до 0,2 мм. Затем выполняют дефектоскопию. При наличии трещин бандажное кольцо заменяют. Удаление трещин местной выборкой металла на посадочной поверхности не допускается.

Часто на носике бандажного кольца обнаруживают некруглость посадочной поверхности, превышающую 0,2 мм, допускаемую при изготовлении бандаж. Появление некруглости при эксплуатации бандаж является признаком остаточной деформации. Вопрос о допуске в дальнейшую эксплуатацию бандажного кольца, имеющего некруглость посадочной поверхности более 0,2 мм, решают в каждом случае индивидуально. Отметим, что имеется опыт длительной эксплуатации генераторов с бандажами, у которых некруглость значительно превышает указанную величину (см. § 5).

Ремонт посадочных мест на бочке ротора. Одновременно с развитием повреждений на носике бандаж развиваются и повреждения посадочной поверхности на бочке ротора. Одиночные местные дефекты — трещины, наклепы, подгары устраняют местной выборкой металла, так же как и на бандажных кольцах. Усталостные трещины на посадочных поверхностях зубцов ротора, появившиеся в результате знакопеременных нагрузок, передаваемых бандажом, как правило, носят массовый характер и местными выборками металла их вывести не удастся.

Плоскость скалывания зубца обычно располагается примерно под углом 60° к посадочной поверхности. Поскольку при своем развитии трещины, как показал опыт, выходят на торец бочки ротора, вызывая лишь скалывание края зубца, они не представляют опасности для прочности ротора. Кусочки же сколовшихся зубцов оказываются достаточно хорошо зафиксированными на своем месте и также не представляют опасности для работы генератора. Поэтому в тех случаях, когда дефектных зубцов немного, ограничиваются зачисткой посадочной поверхности скалывающейся части дефектного зубца на глубину 0,3—0,5 мм с тем, чтобы разгрузить зубец

от знакопеременных нагрузок. В тех случаях, когда трещина вышла на торец бочки ротора, кусок зубца удается легко сколоть. При этом следует проявить осторожность, чтобы не повредить роторную гильзу. Поверхность сколов на роторе в доступных местах зачищают шлифкаменем. Вместо сколовшихся кусков вставляют заполнители, изготовленные из стеклотекстолита.

Если усталостные трещины распространены на значительную часть зубцов, например сколоты большие зубцы и по два-три прилегающих к ним малых зубца, то на бочке ротора протачивают новое посадочное место

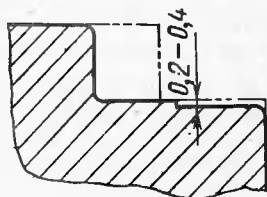


Рис. 27. Проточка нового посадочного места на бочке ротора.

(рис. 27). В этом случае бандажное кольцо заменяют на удлиненное или используют старое с установкой дополнительного кольца на центрирующем кольце. При использовании старого бандажу длину нового посадочного места на бочке задают равной 25 мм, в соответствии с этим толщина дополнительного кольца должна быть равна 25 мм.

Следует отметить, что явление скалывания зубцов встречается обычно на роторах турбогенераторов, длительно работавших с жесткими центрирующими кольцами. Поэтому целесообразно для таких турбогенераторов заказывать только удлиненные (на 40 мм) резервные поковки бандажных колец.

После того как посадочные места на бочке ротора и на бандажном кольце отремонтированы, измеряют посадочные диаметры и производят расчет толщины изоляционной прокладки с учетом обеспечения требуемого натяга. Натяги задаются в соответствии с табл. 9. Изоляционную прокладку изготовляют из стеклотекстолита толщиной 2,5—3 мм, марки СТЭФ, ГОСТ 12652-67. Прокладки нарезают кусками по длине листа стеклотекстолита, тщательно проверяют и калибруют по толщине. По толщине прокладку подгоняют удалением части слоев стеклоткани. При отсутствии стеклотекстолита необходимой толщины прокладку допустимо набрать из нескольких слоев стеклотекстолита меньшей толщины. Как показал опыт, нет необходимости припечки такой про-

кладки к посадочной поверхности бочки ротора, что выполнялось в первые годы применения прокладок.

Ремонт бандажей, поврежденных в аварийном несимметричном режиме работы турбогенератора. Повреждения посадочных мест в результате работы генератора в несимметричном режиме характеризуются ожогами и выплавлением металла; бандажные кольца, как правило, привариваются к посадочному месту. Происходит закалка поверхностного слоя металла бочки ротора со значительным возрастанием твердости. Ремонт после такого повреждения нередко вызывает необходимость частичной или полной перемотки ротора. Рассмотрим примеры ремонтов бандажей, поврежденных в аварийных несимметричных режимах.

Пример 1 (опыт Харьковэнергоремонта). В результате работы турбогенератора ТГВ-200 в течение 10 мин с одной фазой оплавились посадочные поверхности бандажных колец.

Бандажные кольца были отремонтированы следующим образом. Посадочная поверхность бандажа расточена на глубину 3 мм, а торец бандажа подрезан на 2 мм. При этом удалена зона с оплавлениями и ожогами (рис. 28,а). Затем в нагретый до 150 °С бандаж запрессовано латунное кольцо с натягом 0,6 мм, которое изготовлено с припуском на обработку по внутреннему диаметру. После запрессовки латунное кольцо расточено под посадку на ротор (рис. 28,б).

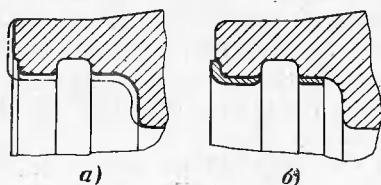


Рис. 28. Ремонт носиковой части бандажного кольца турбогенератора ТГВ-200.

а — обработка носиковой части бандажного кольца; б — запрессовка латунного кольца в бандажное кольцо.

Пример 2 (опыт Мосэнергоремонта) [Л. 6]. В результате работы турбогенератора ТГВ-200 в длительном несимметричном режиме бандажные кольца приварились к бочке ротора. После снятия бандажей обнаружены выплавления на посадочных местах бандажей и бочки ротора. Измерениями определено, что твердость закаленного металла зубцов ротора достигает НВ 420, в то время как на незакаленных участках твердость равна НВ 207. Корпусная изоляция обмотки ротора на выходе из пазов также имела серьезные повреждения. Ремонт выполнялся с полной перемоткой ротора. На бочке ротора были проточены новые посадоч-

ные места. После проточки оставшиеся зоны закаленного металла удалены местной выборкой металла. Бандажи заменены на удлиненные.

Аналогичное повреждение в результате длительного несимметричного режима наблюдалось и на другом турбогенераторе ТГВ-200. В этом случае для уменьшения вероятности трещинообразования на посадочных местах бочки ротора было выполнено упрочнение поверхности закаленных участков наклепом. Упрочнение производилось пневматическим пучковым инструментом по рекомендации ЦНИИТМАШ.

Пример 3 (опыт Уралэнергоремонта). В результате работы турбогенератора ТВ2-100-2 в течение 17 мин в несимметричном (неполнофазном) режиме произошло повреждение ротора. После вывода ротора отмечены оплавления концевых пазовых клиньев и бандажных колец в области больших и прилегающих к ним малых зубцов. Бандажные кольца приварились к посадочной поверхности бочки ротора. При обследовании бочки ротора обнаружены оплавления на глубину до 16 мм, сколы до 20 мм и закаленные участки на больших и прилегающих к ним малых зубцах в торцевой зоне бочки ротора.

Для устранения повреждений было решено вымотать шесть катушек обмотки ротора, проточить новое посадочное место на бочке ротора, изготовить удлиненные на 25 мм бандажные кольца и посадить их на бочку ротора через изоляционную прокладку. После проточки ротора производилось удаление оставшихся закаленных участков шлифмашинками с контролем твердости металла. Выбрать полностью закаленные участки не удалось, поскольку закалка произошла на значительную глубину. Наибольшая твердость НВ 527 была зафиксирована на новом посадочном месте после проточки ротора, в то время как на неповрежденных участках твердость составляла около НВ 200. По согласованию с заводом и ЦКБэнерго было принято решение допустить генератор к эксплуатации. При осмотре ротора генератора через несколько лет эксплуатации трещин не обнаружено.

Устранение дефектов, связанных с коррозионным растрескиванием. Отдельные язвы и группы трещин коррозионного происхождения устраняют местными выборками металла. Если же на поверхности бандажного кольца обнаружено коррозионное растрескивание, носящее массовый характер, то производят проточку поверхности на глубину до 1 мм, обеспечивая чистоту поверхности не ниже класса 6. После проточки и зачистки поверхности мелкозернистой шлифовальной шкуркой производят повторную дефектоскопию электроиндуктивным методом с последующим травлением сомнительных участков и осмотром их с помощью лампы МИР-2 или микроскопа ММУ-1.

Для защиты от коррозионного растрескивания внутреннюю и наружную поверхности бандажного кольца покрывают специальной эмалью марки АКО-3 ЛЭО

«Электросила». Антикоррозионное покрытие наносится после удаления всех поверхностных дефектов. Для нанесения покрытия внутреннюю поверхность бандажного кольца тщательно обезжиривают бензином Б-70 и протирают чистой ветошью. Эмаль АКО-3 наносят на поверхность краскораспылителем. При необходимости эмаль растворяют толуолом или ксилолом до вязкости 18 с по вискозиметру ВЗ-4. Эмаль наносят в два приема: вначале наносят первый слой и дают выдержку 2—4 ч для сушки при спокойном воздухе, затем наносят второй слой и также выдерживают 2—4 ч на воздухе. Окончательную запечку производят при температуре 150—180 °С в течение 1 ч. Нагрев бандажного кольца для запечки производят только индукционным методом. Обычно покрытие внутренней и наружной поверхностей делают раздельно.

Ремонт бандажных колец, оплавленных в результате замыканий обмотки ротора в лобовых частях. Очаг повреждения выбирают шлифмашинкой с мелкозернистым камнем. Выборку делают до полного удаления трещин. При этом необходимо удалить и металл с измененной структурой. Металл с измененной структурой имеет отличительный матовый оттенок. Выборка должна иметь плавные переходы на основную поверхность. После удаления видимых трещин место выборки следует протравить реактивом и осмотреть через лупу МИР-2 или микроскоп ММУ-1. Допустимая глубина выборки определяется в каждом случае индивидуально с учетом состояния бандажного кольца и запаса прочности. Имеется опыт эксплуатации бандажных колец с выборками мест оплавления глубиной до 7%¹ толщины стенки кольца.

Ремонт замкового соединения составных бандажей. Признаками ненормальной работы замкового соединения являются — появление неравномерного зазора в стыке, подгары и оплавления на стыке, повреждения подбандажной изоляции напротив стыка. При обнаружении ненормальностей замка составные части бандаж разъединяют, осматривают посадочные поверхности и измеряют натяги в замке (табл. 7). Если натяг в замке ниже указанной величины или на посадочной поверхности обнаружены трещины, бандаж заменяют.

Ремонт центрирующих колец и посадочных мест на валу ротора. Одиночные дефекты

устраняют местной выборкой металла. При наличии трещин на эластичном элементе Z-образного или мембранного кольца центрирующее кольцо заменяют. При ослаблении натяга центрирующего кольца на вал или бандажного кольца на центрирующее и отсутствии резервной поковки центрирующего кольца натяг допустимо восстановить установкой прокладки из стальной фольги на клее 88. Восстановление натяга за счет установки фольги следует считать временным, предполагающим замену центрирующего кольца в следующий капитальный ремонт.

При значительных повреждениях посадочной поверхности на валу ротора дефектную поверхность протачивают. Глубину проточки определяют в каждом конкретном случае с учетом прочности вала ротора. Центрирующее кольцо в этом случае заменяют.

7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА БАНДАЖНЫХ И ЦЕНТРИРУЮЩИХ КОЛЕЦ

Бандажные кольца изготавливаются из специальных поволоков (см. § 2). Выбор категории поволоков производят по табл. 10.

Перед обработкой бандажного кольца проверяют соответствие геометрических размеров и свойств поковки по паспорту требованиям чертежа.

Заготовка бандажного кольца поставляется с припуском по длине 40 мм на вырезку образцов для механических испытаний.

При изготовлении бандажей производят контрольные механические испытания металла с целью определения прочностных и пластических свойств (остаточные напряжения, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и относительное сжатие). Наряду с этим производится контроль качества металла готовых бандажных колец дефектоскопией электроиндуктивным или цветным методом, ультразвуковой дефектоскопией и визуальным осмотром поверхности. В процессе обработки бандажного кольца ведется также контроль качества металла по излому стружки. Изломы стружки в одном и том же месте указывают на наличие трещин или каких-либо других дефектов (раковины, песочины). При последнем чистовом проходе глубина резания должна быть

Таблица 10

Тип турбогенератора	Категория прочности поковок	Механические свойства металла, кгс/см ²	
		Предел текучести	Предел прочности
T2-25-2; TB2-30-2; TGB-25; TBC-30	II	7 200	8 500
T2270/98; T-25-2; T2-50-2; TB-50-2; TB-60-2; TB2-100-2; TBV-165-2	III	8 500	9 500
TB2-150-2; TBФ-200-2; TBV-200-2; TBV-320-2; TGB-200; TGB-300	IV	9 000	9 800
TGB-500		9 200	9 800
TBV-500		10 000	11 000

наименьшей, чтобы выявить мелкие трещины. Следует помнить, что метод взятия тонкой стружки является весьма эффективным для обнаружения даже мельчайших неглубоких трещин.

Для определения механических свойств металла от заготовки бандажного кольца отрезают кольца сечением 25×25 мм, из которых изготовляют образцы. Для бандажных колец III и IV категорий кольца отрезаются со стороны верха слитка (сторона, противоположная стороне маркировки). Количество колец — два (наружное и внутреннее). Наружное кольцо используется для определения остаточных напряжений и вырезки образцов, а внутреннее — только для вырезки образцов.

Для бандажных колец I и II категорий кольца отрезают со стороны низа слитка (сторона маркировки). Если чистовая толщина готового бандажного кольца менее 58 мм, то вырезают только одно внутреннее кольцо. Определение остаточных напряжений в этом случае не производится.

На время обработки бандажному кольцу присваивают условный номер, а имеющуюся на нем маркировку завода-поставщика переписывают в журнал, предварительно сверив ее с данными паспорта. Условный номер записывают мелом на поверхности бандажа и сохраняют

на все время обработки, переписывая при необходимости с одной поверхности на другую.

Обработку бандажных колец выполняют на карусельном или токарном станке. Предпочтение следует отдать обработке колец на карусельном станке, так как на токарном станке заготовка бандажного кольца крепится консольно, а поэтому усилия крепления, а значит и деформации изготавливаемой детали, больше, чем на карусельном станке. Технология изготовления бандажей на карусельном и токарном станках по существу совпадает. Ниже рассматривается изготовление бандажных колец на токарном станке. Обработку бандажей выполняют инструментом с напайкой пластинок Т30К4, Т15К6, Т15К10.

Поковку устанавливают в кулачках на разжим и выверяют с точностью до 1 мм по цилиндрической поверхности и обрабатывают наружную поверхность на длине 25 мм до получения максимального чистового диаметра готового бандажного кольца. Чистота поверхности должна быть не ниже класса 5. Измеряют наружный диаметр обработанного цилиндра по шести зафиксированным точкам через каждые 30°. Затем отрезают наружное кольцо сечением 25×25 мм и измеряют наружный диаметр отрезанного кольца по шести ранее зафиксированным точкам. Для исключения ошибок измерения диаметров до и после отрезки кольца следует выполнять после остывания детали до окружающей температуры. Вычисляют средний диаметр кольца до и после отрезки как среднеарифметическую величину шести измерений. Величина остаточных напряжений, кгс/см², определяется по формуле

$$\sigma_{\text{ост}} = \pm E \frac{D_1 - D_0}{D_0},$$

где E — модуль упругости стали, равный $2,1 \cdot 10^6$ кгс/см²; D_0 — средний наружный диаметр кольца до отрезки, мм; D_1 — средний наружный диаметр кольца после отрезки, мм.

Величина остаточных напряжений для бандажных колец всех категорий должна быть не более 1400 кгс/см². Если превышение остаточных напряжений над указанной величиной составляет не более 200 кгс/см², то допуск такого кольца в работу возможен, но по согласованию с поставщиком.

Затем отрезают внутреннее кольцо, предварительно обработав внутреннюю поверхность поковки на длине 25 мм до получения минимального чистового диаметра готового бандажного кольца.

На кольца наносят кернения, обозначающие места наибольшего и наименьшего наклепа, в соответствии с кернениями, имеющимися на поковке, а также условный номер бандажного кольца.

Из наружного кольца после определения остаточных напряжений вырезают в зоне наименьшего наклепа (закерненной двумя линиями) и в зоне наибольшего накле-

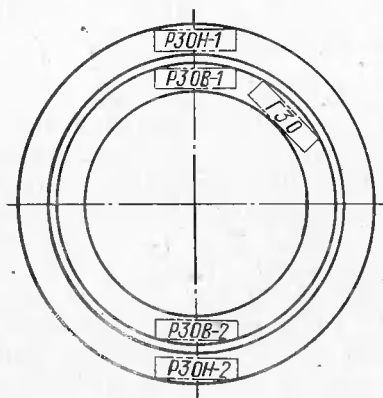


Рис. 29. Схема вырезки образцов для механических испытаний, проводимых перед изготовлением бандажных колец.

па (закерненной одной линией) по одной заготовке разрывных образцов размерами $20 \times 20 \times 140$ мм (рис. 29). Вырезку образцов следует производить только механическим способом. Из внутреннего кольца вырезают в зоне наибольшего наклепа, закерненной одной линией, одну заготовку для разрывных образцов размерами $20 \times 20 \times 140$ мм и одну заготовку для гибового образца размерами $10 \times 20 \times 160$ мм. Заготовки для гибового образца вырезают таким образом, чтобы продольная ось образца в средней части находилась на расстоянии 10 мм от внутренней чистовой поверхности кольца. Из внутреннего кольца в зоне наименьшего наклепа, закерненной двумя линиями, вырезают одну заготовку для разрывного образца размерами $20 \times 20 \times 140$ мм. Заготовки

разрывных образцов маркируют следующим образом: выбивают условный тип образца, условный номер бандажного кольца и номер образца, включающий в себя тип кольца и зону наклепа. Например, Р30Н-1, Р30Н-3, Р30В-1, Р30В-2, что означает: Р—образец разрывной, 30—условный номер бандажного кольца (пример), Н—образец из наружного кольца, В—образец из внутреннего кольца, 1—образец вырезан в зоне наибольшего наклепа, 2—образец вырезан в зоне наименьшего наклепа. Заготовку гибового образца маркируют таким образом: выбивают условный тип образца и условный номер бандажного кольца, например Г30, что означает образец гибовый, условный номер бандажного кольца 30. На оставшихся участках колец около зон выреза образцов наносят маркировку соответственно тем образцам, которые в этих зонах вырезались.

Заготовки для разрывных образцов бандажных колец с чистовой толщиной стенки менее 58 мм вырезают по оси кернения (две заготовки размерами $20 \times 20 \times 140$ мм) и по оси, перпендикулярной оси кернения (две заготовки размерами $20 \times 20 \times 140$ мм). Заготовку для гибового образца (размерами $10 \times 20 \times 160$ мм) вырезают в зоне наибольшего наклепа рядом с заготовкой для разрывного образца.

Разрывные образцы изготовляют в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-61 для пятикратного образца диаметром 10 мм. Для получения требуемой стандартом чистоты поверхности рабочей части образца (класс 8) образец шлифуют. Технология обработки образцов должна исключать возможность перегрева или наклепа образца во избежание изменения свойств металла. При последнем проходе глубина резания не должна быть более 0,3 мм. Гибовые образцы обрабатывают на строгальном станке до чистоты поверхности не ниже класса 4. Обработка производится остро заточенным резцом. Направление движения резца должно быть только вдоль образца. Острые кромки образца на рабочей части (длина не менее 110 мм) скругляют по радиусу 1—2 мм наждачным кругом в продольном по образцу направлении. При строгании необходимо принять меры, исключющие появление на поверхностях рабочей части образца поперечных рисок или следов обработки.

Испытание растяжением разрывных образцов производится по ГОСТ 1497-61 при скорости перемещения за-

хвата не более 5 мм/мин до предела текучести и не более 20 мм/мин за пределом текучести. При испытаниях растяжением определяют предел текучести, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и относительное сжатие. При этом разница между временным сопротивлением разрыву и пределом текучести не должна быть более 600 кгс/см² для каждого образца. Допускается снижение минимального значения предела текучести и временного сопротивления разрыву на наружных образцах на 200 кгс/см² относительно величин, предусмотренных техническими условиями МВТУ-УМ-66-1. Если разрыв происходит вне средней трети расчетной длины образца, то определение удлинения в этом случае произвести невозможно (допускается замена образца). При получении неудовлетворительных результатов испытаний производится повторное испытание на удвоенном количестве образцов.

При испытании на гиб образец укладывают на опорные ролики стороной, соответствующей наружной поверхности бандажного кольца. Диаметр опорных роликов должен быть равен 40—50 мм. Скорость перемещения оправки при испытании должна быть в пределах 10—20 мм/мин. Выдержавшим испытания считается образец, не сломавшийся после загиба вокруг оправки диаметром 40 мм до параллельности сторон (на угол 180°) и не имеющий поверхностных трещин и расслоений. Допускается не более трех отдельных мелких надрывов длиной не более 1,5 мм каждый. Если на образце после испытаний появились надрывы, превышающие по размерам и количеству нормы, то допускается производить новое испытание на образце со шлифованной поверхностью. При обработке направление шлифования должно быть строго продольным. На результаты испытаний на гиб в значительной степени влияет поверхностный наклеп, образующийся при изготовлении образца неисправным инструментом. Поэтому образец, не выдержавший испытание, следует прежде всего проверить на наличие поверхностного наклепа. Если на образце есть поверхностный наклеп, то испытание считается недействительным, а образец бракуется. Повторное испытание производится на вновь изготовленном образце, заготовку которого вырезают на участке кольца, ближайшем к тому месту, где была вырезана заготовка неправильно изготовленного образца.

Ниже в качестве примера рассматривается технология обработки бандажного кольца турбогенераторов ТВВ-165-2, ТВФ-100-2.

После отрезки колец для испытаний заготовку бандажа устанавливают в кулачки патрона станка на разжим верхом слитка (немаркированная сторона) к планшайбе. Заготовку устанавливают с точностью 0,5 мм, контролируя биение по наружной поверхности (рис. 30,а).

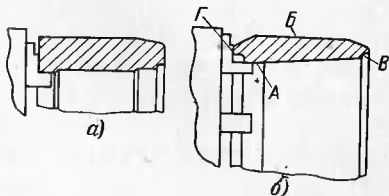


Рис. 30. Изготовление бандажного кольца турбогенераторов ТВВ-165-2, ТВФ-100-2 на токарном станке.

Подрезают торец заготовки, оставляя припуск 5 мм по длине бандажа. Обтачивают наружную поверхность, оставляя припуск 2 мм на сторону. Растачивают внутреннюю поверхность до кулачков, оставляя припуск 2 мм на сторону относительно минимального чистового диаметра. Затем производят чистовую обработку наружной поверхности тыльной части бандажа и радиусный переход с конусной на торцовую поверхность бандажа. Растачивают внутреннюю поверхность бандажа под посадку на центрирующее кольцо. При этом необходимо учитывать температуру, при которой производились измерения посадочных поверхностей центрирующего кольца и бочки ротора. В случае существенной разницы (свыше 10 °С) следует внести температурную поправку в размер диаметра посадочной поверхности бандажного кольца. Растачивают на посадочной поверхности уступ под кольцевую шпонку, выполняя необходимые радиусные скругления. Шлифуют обработанные поверхности шлифовальной шкуркой на полотне марки Э (зернистость 80). Чистота всех обработанных поверхностей должна соответствовать классу не ниже 6. После окончания обработки тыльной части бандажа заготовку переставляют обработанной стороной к планшайбе и закрепляют в кулачках на разжим с медными прокладками (рис. 30,б). Точность установки должна быть не ниже 0,05 мм.

Подрезают торец носика бандажа до получения чистовой длины бандажа. Точат конус наружной поверхности носиковой части бандажа и радиусный переход с конусной на торцовую поверхность бандажа. Растачи-

вают внутреннюю поверхность по цилиндру вровень с проточенной поверхностью при первой установке. Растачивают внутреннюю поверхность носика бандажа под посадку на бочку ротора, сначала с припуском по 1,5 мм, а затем начисто, выполняя необходимые радиусные переходы. Растачивают начисто конус внутренней поверхности бандажа и радиусный переход с конической на торцовую поверхность носика бандажа. Шлифуют обработанные поверхности шлифовальной шкуркой марки Э (зернистостью 80) до получения чистоты не ниже класса 6. Не снимая со станка, проверяют биение поверхностей *Б* и *В* относительно поверхности *А*, которое не должно быть более 0,1 мм.

Затем снимают бандажное кольцо со станка и проверяют конусность и некруглость поверхностей *А* и *В*. Конусность должна быть не более 0,03 мм. Некруглость должна быть не более 0,2 мм. Измеряют все размеры бандажного кольца и сравнивают их с чертежами.

По окончании механической обработки для выявления поверхностных дефектов бандажное кольцо подвергается осмотру через лупу 10-кратного увеличения и цветной дефектоскопии или контролю электроиндуктивным методом.

Для выявления внутренних дефектов каждое бандажное кольцо подвергается ультразвуковому контролю. По техническим условиям МВТУ-УМ-66-1 предусматривается ультразвуковой контроль заготовок бандажных колец, изготовленных по усовершенствованной технологии (с 1962 г.). Эти бандажные кольца отличаются от колец, изготовленных до 1962 г., мелкозернистой структурой. Ультразвуковой контроль производится по инструкции ЦНИИТМАШ с применением имитатора дефектов типа ИД-1 или ИД-2. Ультразвуковой контроль позволяет выявить внутренние дефекты размерами не менее 3 мм. Результаты ультразвукового контроля являются факультативными.

Принятое бандажное кольцо маркируют нанося на поверхности эмалью маркировку завода-поставщика: номер плавки, номер поковки и номер заводского заказа.

Изготовление эластичных центрирующих колец. Эластичные центрирующие кольца изготовляют из поволоков магнитной легированной стали, поставляемых по техническим условиям ТУ 16-582001-70. Так же как и поковки бандажей, поковки центрирую-

щих колец сопровождаются паспортом (сертификатом). Прежде чем приступить к изготовлению, проверяют соответствие указанных в паспорте механических свойств и размеров поковки требованиям чертежа. Одна поковка центрирующих колец поставляется, как правило, из расчета изготовления двух центрирующих колец. Поковка имеет припуск по длине 40 мм на вырезку образцов для механических испытаний. На время обработки центрирующему кольцу присваивают условный номер, а имеющуюся на поковке маркировку переписывают в журнал, сверив ее с данными паспорта.

Технологию изготовления Z-образного центрирующего кольца рассмотрим на примере изготовления центрирующего кольца турбогенераторов ТВФ-100-2, ТВВ-165-2. К центрирующему кольцу предъявляют следующие технические требования: конусность поверхности 4 не более 0,03 мм, некруглость не более 0,05 мм, биение поверхности 3 относительно поверхности 4 не более 0,1 мм, торцовое биение поверхностей 2 и 6 относительно поверхности 4 не более 0,05 мм.

Поковку закрепляют на разжим в четырехкулачковом патроне с точностью до 1 мм (биение наружной поверхности). Затем из припуска отрезают кольцо размерами в сечении 25×25 мм (рис. 31,а), на которое наносится клеймо условного номера центрирующего кольца.

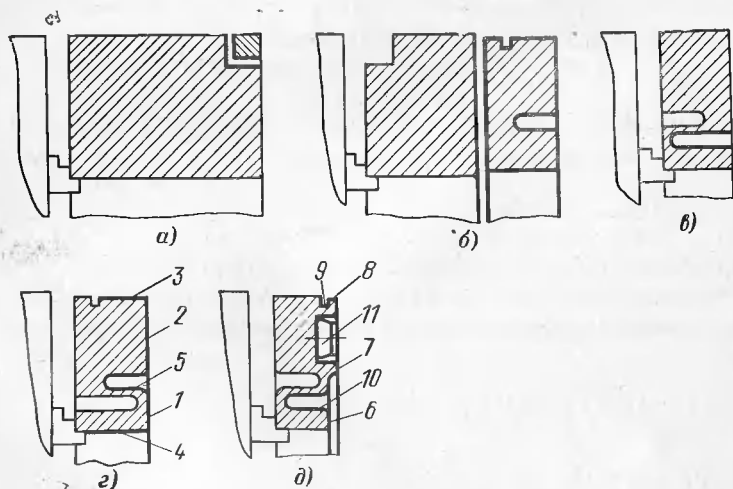


Рис. 31. Изготовление Z-образного центрирующего кольца на токарном станке.

Из кольца изготавливают два пятикратных нормальных образца для испытания на разрыв по ГОСТ 1497-61.

После отрезки колец поковку переставляют другим торцом к планшайбе и выполняют черновую обработку внутреннего и наружного цилиндра и торца. На торце обрабатывают начерно кольцевую выточку и отрезают заготовку одного центрирующего кольца (рис. 31, б). Затем заготовку кольца устанавливают на станок обработанным торцом к планшайбе и обрабатывают начерно кольцевую выточку (рис. 31, в). Для чистовой обработки заготовку устанавливают на станок, как указано на рис. 31, г и обрабатывают начисто поверхности 1, 2, 3, 4 и 5. После этого центрирующее кольцо переставляют другим торцом к планшайбе (рис. 31, д) и обрабатывают начисто поверхности 6, 7 и 8, кольцевые канавки 9 и 11 и кольцевую выточку 10. Обработку кольцевых выточек выполняют специальными резцами с напайками пластинок Т30К4, Т15К6 или Т5К10. Глубина выточек выполняется с допуском 0,2 мм. Контроль глубины выточек осуществляют двусторонним шаблоном. Одна сторона шаблона имеет размер 68,2 мм, другая — 68,0 мм.

Посадочные поверхности, а также поверхности кольцевых выточек шлифуют до чистоты класса 6. Поверхности радиусных переходов на эластичном элементе шлифуют до чистоты класса 7. Остальные поверхности обрабатывают до чистоты класса 4. После токарной обработки в центрирующем кольце сверлят крепежные отверстия и нарезают резьбу. В канавке под балансировочные грузы фрезеруют колодцы.

Готовое центрирующее кольцо подвергают контролю магнито-порошковым методом, ультразвуком и осмотру поверхности через лупу. Следует отметить, что иногда на поверхности готового кольца обнаруживают многочисленные точечные дефекты, которые являются следами обработки резцом и которые могут быть ошибочно классифицированы как песочины. Следы резца легко удаляются зачисткой поверхности шлифовальной шкуркой.

8. РЕКОНСТРУКЦИЯ БАНДАЖЕЙ

Реконструкция роторных бандажей имеет своей целью повышение надежности работы турбогенератора. Все виды рассмотренных ниже реконструкций касаются улуч-

шения двухпосадочных бандажей. Конечно, радикальной мерой является переход на консольное исполнение роторного бандажа. Но опыта таких реконструкций пока нет.

Реконструкция с переходом на однопосадочный отставленный бандаж, как показал опыт (Дальэнергоремонт), не приемлема для турбогенераторов серий Т2, ТВ2 мощностью 25 МВт и выше из-за появляющихся при этом недопустимых перемещений носика бандажного кольца относительно обмотки ротора в процессе эксплуатации.

Установка мембранных центрирующих колец на турбогенераторах Т2-50-2, ТВ-50-2 и ТВ-60-2. В настоящее время широкое распространение в ремонтной практике получают эластичные центрирующие кольца мембранного типа. Центрирующие кольца мембранного типа и Z-образные являются равноценными по эластичности. Но по механической прочности мембранные центрирующие кольца имеют преимущества перед Z-образными кольцами. Суммарные статические напряжения, которые возникают от горячей посадки кольца на вал, в гибком элементе мембранного кольца составляют около 70% соответствующих напряжений в Z-образном кольце. А знакопеременные напряжения, возникающие на рабочих частотах вращения в гибком элементе мембранного кольца, составляют всего лишь 30—35% напряжений в Z-образном кольце. Следует отметить также, что мембранные кольца более просты в изготовлении.

Главным техническим управлением Министерства энергетики и электрификации СССР рекомендована установка мембранных центрирующих колец на турбогенераторах Т2-50-2, ТВ-50-2 и ТВ-60-2 при повреждениях Z-образных колец (рис. 32).

Для реконструкции изготавливают новые мембранные центрирующие кольца, болты для крепления вентиляторов, балансировочные грузы и дообрабатывают фирменные вентиляторы.

Центрирующие кольца изготавливают до начала ремонта с припусками по наружной и внутренней цилиндрическим поверхностям, а также с припуском по посадочной поверхности под вентилятор. Окончательная обработка выполняется после снятия бандажей и измерения необходимых размеров. Для мембранного центрирующе-

го кольца турбогенераторов Т2-50-2, ТВ-50-2 и ТВ-60-2 устанавливают следующие натяги, мм:

Центрирующее кольцо — вал	0,43—0,53
Бандажное кольцо — центрирующее кольцо	1,6—1,7
Бандажное кольцо — точка ротора с изо- ляционной прокладкой	1,6—1,7

Вентилятор устанавливают в заточку на центрирующем кольце с зазором 0—0,15 мм. Для обеспечения такого зазора диаметр заточки

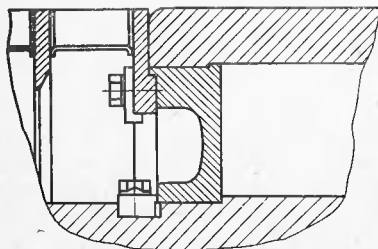


Рис. 32. Бандаж ротора турбогенератора ТВ-60-2 с мембранным центрирующим кольцом.

на центрирующем кольце задают для обработки на 0,5 мм больше, чем диаметр посадочной поверхности вентилятора. Это связано с тем, что диаметр заточки под вентилятор после надевания бандажного кольца уменьшится из-за деформации центрирующего кольца от усилий натяга. Отверстия для крепления венти-

ляторов на мембранном кольце размечают для сверления по отверстиям на вентиляторе. В связи с тем что на мембранных кольцах балансировочные грузы устанавливают под болты крепления вентиляторов, количество крепежных отверстий и болтов по сравнению с Z-образными кольцами удвоено. Поэтому на каждом вентиляторе сверлят дополнительно по восемь отверстий диаметром 22 мм. Крепежные болты в количестве 16 шт. на каждый вентилятор изготавливают из стали 15Х. Балансировочные грузы изготавливают из Ст. 3. Допустимая масса балансировочных грузов, закрепленных на мембранном кольце, не более 1,5 кг). Во время реконструкции заменяют металлические дистанционные сегменты между центрирующим кольцом и стальной торцевой шайбой стеклотекстолитовыми.

В связи с различием в конструкциях генераторов Т2-50-2 (см. § 3) переход на мембранные кольца у этих генераторов осуществляется различными путями. На турбогенераторах послевоенного выпуска работы по замене жестких колец на мембранные практически ничем не отличаются от работ по замене Z-образных центрирующих

описанных выше. Разница заключается в следующем: диск вентилятора растачивают по внутреннему диаметру до размера 810 мм и сверлят 16 отверстий диаметром 22 мм на диаметре 850 мм. В связи с тем что ширина жесткого центрирующего кольца больше ширины Z-образного и мембранного колец, выполняют специальную дообработку бандажного кольца (рис. 33), а новое мембранное кольцо изготавливают в соответствии с дообработанным бандажным кольцом. Ширину внутренней посадочной поверхности мембранного кольца выполняют одинаковой с шириной посадочной поверхности на старом жестком кольце.

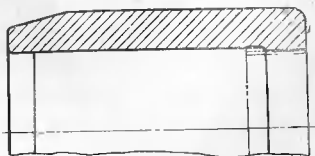


Рис. 33. Дообработка бандажного кольца турбогенератора Т2-50-2, ТВ-50-2 при замене жестких центрирующих колец на эластичные.

На турбогенераторах Т2-50-2 довоенного выпуска с совместным снятием бандажного и центрирующего колец и креплением центрирующего кольца от осевого смещения наклонными стопорными винтами при установке мембранных колец выполняют реконструкцию этих узлов. Разрушение посадочных мест вследствие двойной посадки с жесткими центрирующими кольцами наблюдается и на турбогенераторах мощностью 25—30 Мвт (ТВ2-30-2, Т2-25-2, Т-25-2). ЦКБэнерго рекомендует при обнаружении разрушений посадочных мест на этих турбогенераторах также устанавливать мембранные центрирующие кольца.

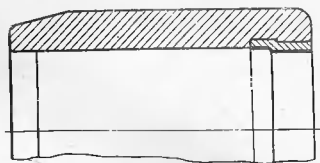


Рис. 34. Дообработка бандажа при переходе на раздельное снятие бандажного и центрирующего колец.

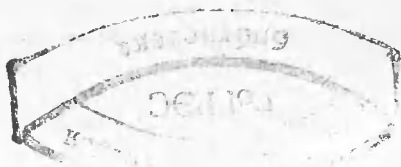
Переход на раздельное снятие двух посадочных бандажей. Во время ремонтов с заменой центрирующих или бандажных колец на турбогенераторах довоенного выпуска рекомендуется выполнить реконструкцию посадки бандажа на центрирующее кольцо с целью обеспечения раздельного снятия.

Если бандажное кольцо не подлежит замене, то реконструкцию выполняют следующим образом. Старое центрирующее кольцо выпрессовывают из бандажного

кольца, проверяют состояние посадочных поверхностей. Если состояние поверхностей удовлетворительное, собирают снова центрирующее кольцо с бандажным кольцом и растачивают центрирующее кольцо, как указано на рис. 34, под посадку на новое мембранное центрирующее кольцо. Если же старое центрирующее кольцо имеет дефекты на посадочной поверхности, то изготавливают вставку из стали 35 или из стали 45. Для этой цели стальную полосу необходимого сечения с припуском по 10 мм на сторону загибают в кольцо и стык сваривают кузнечной сваркой. Затем из полученного кольца точат вставку, оставляя припуск по внутреннему диаметру. Для обработки кольца по наружной поверхности задают размеры по конфигурации посадочной поверхности бандаж, обеспечивая натяги по поверхности 1,6—1,7 мм для турбогенератора Т2-50-2 и 1,2—1,3 мм для турбогенератора Т2-25-2. Такие же натяги задают и для сопряжения нового центрирующего кольца с бандажным кольцом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уринцев Я. С. Индукционный нагрев бандажных колец, — «Энергетик», 1969, № 7.
2. Фомин Б. Н., Циханович Б. Г., Виро Г. М. Турбогенераторы. М., «Энергия», 1966.
3. Рябченков А. В., Сидоров В. П. Коррозионное растрескивание высокопрочной аустенитной стали 60Х3Г8Н8В. — «Защита металлов», 1967, т. 3, № 6.
4. Логан Ф. Коррозия металлов под напряжением. М., «Металлургия», 1970 г.
5. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита металлов. М., «Металлургия», 1970.
6. Румянцев А. И. Восстановительный ремонт ротора турбогенератора типа ТГВ-200. — «Энергетик», 1970, № 5.
7. Изосимов Л. Д., Паненкова Л. С., Верховский Г. Г. Электрондуктивный метод контроля роторных бандажных колец турбогенераторов. — «Энергетик», 1970, № 8.
8. Греков Н. А., Пименова Л. Н. Роторные бандажные кольца турбогенераторов. М., «Энергия», 1965.



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Назначение роторного бандажа и характер нагрузок	4
2. Материалы деталей роторных бандажей	7
3. Конструкции роторных бандажей	12
4. Разборка и сборка роторных бандажей	21
5. Повреждение бандажей в эксплуатации	45
6. Ремонт бандажей	70
7. Изготовление и контроль качества бандажных и центрирующих колец	83
8. Реконструкция бандажей	92
Список литературы	96

Цена 20 коп.