

УДК 621.73.011

Токарев А. Г.  
Савчинский И. Г.  
Сивак Р. И.

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЗАГОТОВОК БАНДАЖНЫХ КОЛЕЦ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ МОЩНОСТЬЮ 500 МВт

Бандажные кольца турбогенератора предназначены для удержания лобовых частей электрической обмотки на роторе. Материал заготовок бандажных колец должен обладать высокой прочностью ( $\sigma_{0,2} \geq 1150$  МПа), достаточной пластичностью ( $\delta \geq 20$  %,  $\psi > 35$  %) и хорошей магнитной проницаемостью. До недавнего времени заготовки бандажных колец изготавливались в ОАО «Уралмаш» из сталей 60ХЗГ8Н8В или 55Х4Г18. Технология изготовления колец из этих сталей включала следующие операции: выплавка стали в электропечи, отливка слитка, ковка кольцевой поковки, аустенизация, деформационный наклеп раскаткой на оправке, отпуск и испытания служебных свойств. И технология, и применяемый материал давали возможность получать заготовки бандажных колец с недостаточно высокой прочностью ( $\sigma_{0,2} \geq 900$  МПа) и коррозионной стойкостью [1–2].

Целью данной работы является разработка способа получения заготовок бандажных колец турбогенератора повышенной прочности путём их пластической деформации в условиях всестороннего сжатия жидкостью высокого давления.

Деформация в условиях всестороннего сжатия позволяет не только увеличить предел текучести, но и существенно улучшить структуру деформированного металла [1–4]. Для повышения прочности материала заготовок в ГНЦ ЦНИИТмаш был разработан и внедрен в ОАО «Уралмаш» способ упрочнения заготовок бандажных колец гидрорастяжением. Для этого в ОАО «Уралмаш» были спроектированы и изготовлены пресс усилием 300 МН и установка для упрочнения заготовок бандажных колец жидкостью под давлением до 300 МПа.

Новые оборудование и способ упрочнения дали возможность изготавливать заготовки бандажных колец, материал которых имел требуемый уровень прочности ( $\sigma_{0,2} \geq 1150$  МПа).

Для повышения коррозионной стойкости при сохранении высокой прочности заготовок бандажных колец в ОАО «Уралмаш» было предложено изготавливать их из азотистой стали 12Х18АГ18Ш [5, 6]. Технология изготовления заготовок бандажных колец из этой стали должна включать: выплавку стали в электропечи, отливку слитка, ковку электрода для ЭСП, электрошлаковый переплав, ковку кольцевой заготовки, аустенизацию, рекристаллизационную обработку, включающую деформационный наклеп и термообработку, повторную аустенизацию и деформационный наклеп до требуемого уровня свойств. Так как представленная выше технология содержит две последовательные операции деформационного упрочнения методом гидравлического растяжения, возрастает относительная толщина стенки кольцевой заготовки перед первым упрочнением и, соответственно, требуемое для деформации давление рабочей жидкости может превысить значение 300–350 МПа. В этом случае необходимо будет или изготавливать новую насосную установку с максимальным давлением 400 МПа, или разработать способ безнасосной гидрораздачи кольцевых заготовок.

В данной работе предложено делать эту операцию без применения насоса высокого давления путём внедрения во внутреннюю полость заготовки, предварительно заполненную рабочей жидкостью, двух одинаковых конических тел с такой образующей конической поверхности, которая обеспечивает сохранение цилиндрической формы заготовки после деформации её на 20–30 %. Расчёты и лабораторное исследование при деформации моделей заготовок по такой схеме показали, что форма образующей конической поверхности инструмента зависит от степени необходимой деформации и отношения исходной высоты заготовки к её внутреннему диаметру. Для каждой комбинации этих параметров может быть выбран свой угол конусности инструмента, который обеспечивает получение прямолинейной и цилиндрической формы заготовки после заданной деформации.

На основании лабораторных исследований разработано устройство для безнасосной гидрораздачи заготовок бандажных колец турбогенераторов в холодном состоянии на 20–30 % по внутренней поверхности и на 15–20 % – по наружной. Такая деформация обычно используется для наклепа заготовок из стали 12X18AG18Ш перед рекристаллизационной термической обработкой, применяемой для снижения величины зерна и улучшения структуры заготовки. Перед деформацией такие заготовки обычно имеют внутренний диаметр более 550 мм и относительную высоту (отношение высоты заготовки к её внутреннему диаметру) в пределах 1,9–2,3. В связи с таким значением относительной высоты исключается возможность наклепа этих заготовок способом кузнечной раскатки на оправке.

Устройство для безнасосной гидрораздачи будет установлено на прессе 300 МН ОАО «Уралмаш». При проектировании устройства использованы отдельные элементы существующего на заводе штампа для гидрораздачи и разработанного ранее в ГНЦ ЦНИИТМАШ и на Уралмашзаводе штампа для гидрораздачи.

Основные размеры колец в состоянии до и после деформации приведены в табл. 1. Размеры колец в состоянии после предварительного растяжения ( $D$ ,  $d$ ,  $H$ ) согласованы с ОАО «Уралмаш». Размеры колец перед предварительным гидрорастяжением ( $D_0$ ,  $d_0$ ,  $H_0$ ) определяются следующим образом:

$$d_0 = \frac{d}{(1 + \varepsilon)}; \quad (1)$$

$$H_0 = H \cdot (1 + \beta \cdot \varepsilon), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – степень деформации кольца на внутренней поверхности;

$\beta$  – отношение средней осевой деформации к максимальной тангенциальной деформации кольца.

Таблица 1

Размеры заготовок и инструмента при гидрораздаче

№ чертежа 4528...	Размеры колец после раздачи, мм			Размеры колец до раздачи, мм			Угол конуса (расч.), град.	Параметры инструмента, мм					Давление, МПа	Усилие, МН
	d	H	D	d <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	D <sub>0</sub>		Р ход Р <sub>х</sub>	Откр. высота L <sub>1</sub>	Оправка L	Втулка С	Заход В		
066	764	1060	1013	588	1171	864	19,06	745	2620	950	350	168	292	133
112	778	1153	1085	598	1271	936	17,92	672	2596	1000	400	290	344	163
124	817	1042	1028	628	1150	864	20,60	690	2383	800	200	42	238	124
298	738	971	984	568	1074	840	20,01	626	2492	950	350	278	298	128
299	765	1057	1038	588	1167	890	19,13	655	2523	950	350	252	316	145
300	782	1066	1040	602	1179	887	19,37	667	2492	900	300	196	296	141
310	786	1183	1079	605	1308	928	17,67	682	2612	1000	400	286	328	159
392	803	869	1092	618	940	942	23,89	640	2204	650	0	-38	319	161
648	750	1107	996	577	1223	850	17,99	648	2613	1050	450	335	293	130
791	794	1103	1076	611	1219	922	19,04	679	2504	900	300	184	315	156
792	740	1056	975	569	1166	830	18,57	636	2581	1050	400	346	285	123
812	765	1045	1038	588	1154	890	19,34	654	2510	950	350	241	316	145
906	736	1095	997	566	1210	854	17,86	638	2634	1050	450	396	314	133

При расчете исходных размеров заготовок по формулам (1) и (2) принято:  $\varepsilon = 0,30$ ;  $\beta = 0,35$ . Деформация 30 % на внутренней поверхности обеспечит достаточную деформацию всего объема кольца и необходимые структурные преобразования в заготовке при рекристаллизационной обработке, а значение  $\beta = 0,35$  принято из опыта деформации колец в ОАО «Уралмаш» при раздаче заготовок с помощью насоса высокого давления. После деформирования опытной партии колец на проектируемом устройстве значения этого коэффициента будут уточнены. Величина наружного диаметра заготовки до упрочнения ( $D_0$ ) определяется из условия сохранения объема при деформации.

При безнасосной гидрораздаче деформация заготовки происходит за счет внедрения во внутреннюю полость заготовки, предварительно заполненную рабочей жидкостью, двух конических тел с таким углом конусности, который обеспечивает сохранение прямолинейной образующей в деформированной на заданную величину заготовке. При этом условии угол конусности пуансонов можно определить из уравнения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(1 + \varepsilon)^3 - 1}{(1 + \varepsilon) \cdot (1 + \beta \varepsilon)} \cdot \left[ \frac{(1 + \varepsilon)^2}{1 + \beta \varepsilon} - 1 + \gamma \right] : \frac{3H}{d}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий сжимаемость воды под давлением и неконтролируемые утечки. При давлении 250–350 МПа и  $\gamma = 0,03–0,05$ .

Величины углов, рассчитанных по формуле (3) для необходимых колец, приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что угол конусов должен быть принят в пределах 18–19°, за исключением нескольких особо коротких заготовок, имеющих перед растяжением относительную высоту 1,55–1,90 (№№ 4528392, 4528124, 4528298). При проектировании инструмента для гидрораздачи всей группы заготовок принято:  $\alpha = 18^\circ$ .

Схема безнасосной гидрораздачи приведена на рис. 1. Заготовка перед деформацией устанавливается между верхним и нижним конусами, которые центрируются между собой с помощью оправки, закрепленной на верхнем конусе, и втулки, установленной на нижнем конусе. Оправка и втулка являются сменными деталями и их длины зависят от размеров деформируемых колец. Деформация колец на заданную величину производится за один ход прессы.

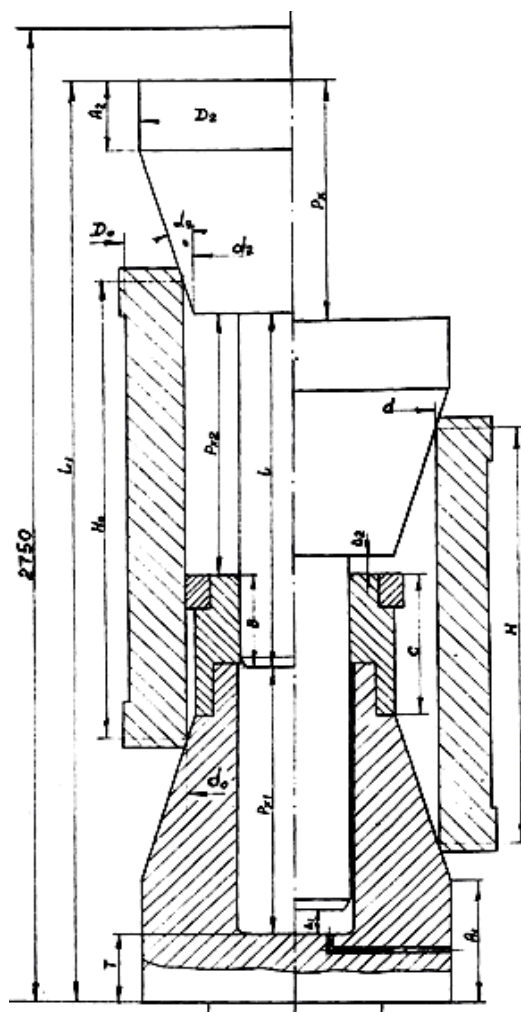


Рис. 1. Схема безнасосной гидрораздачи колец

Расчет необходимых значений длин оправки и втулки производится следующим образом. Определяется открытая высота штампа ( $L_1$ ) и рабочий ход верхнего конуса ( $P_x$ ) по формулам 4 и 5:

$$L_1 = A_1 + A_2 + H_0 + \frac{(D_1 - d_0)}{\operatorname{tg}18^\circ}; \quad (4)$$

$$P_x = \frac{(d - d_0)}{\operatorname{tg}18^\circ} + H_0 - H, \quad (5)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – высота цилиндрических участков нижнего и верхнего конусов ( $A_1 = 350$  мм,  $A_2 = 200$  мм);

$H_0$ ,  $H$ ,  $d_0$  и  $d$  – высота и внутренний диаметр деформируемых заготовок;

$D_1$  – максимальный диаметр конусов ( $D_1 = 850$  мм). Открытая высота штампа не должна быть больше 2650–2700 мм, рабочий ход – не больше 1200 мм.

Длина ( $L$ ) необходимой оправки определяется из условий (6) и (7):

$$L + P_{x1} = L_1 - (T + A_2 + L_{k2}); \quad (6)$$

$$P_{x1} \geq P_x + 50, \quad (7)$$

где  $P_{x1}$  – максимально возможный ход оправки;

$T$  – толщина дна нижнего конуса ( $T = 200$  мм);

$L_{k2}$  – высота конического участка верхнего конуса ( $L_{k2} = 461,65$  мм). Длина оправки выбирается из ряда  $L = 900 - 950 - 1000 - 1050$  мм.

Длина втулки ( $C$ ) определяется из условий (8) и (9):

$$C + P_{x2} = L_1 - (A_1 + A_2 + L_{k1} + L_{k2}); \quad (8)$$

$$P_{x2} \geq P_x + 50, \quad (9)$$

где  $P_{x2}$  – максимально возможный ход верхнего конуса до втулки;

$L_{k1}$  – высота конического участка нижнего конуса ( $L_{k1} = 461,65$  мм). Длина втулки выбирается из ряда:  $C = 300 - 350 - 400 - 450$  мм.

Величина минимального захода оправки в отверстие втулки  $B = L - P_{x2}$ .

Результаты расчетов указанных выше параметров штампа для деформации заданной группы бандажных колец приведены в табл. 1, из которой видно, что максимальная открытая высота штампа равна 2634 мм, а максимальный рабочий ход – 745 мм. По результатам расчетов видно, что для деформации заготовок № 392 и № 124 требуется специальный инструмент (конуса с другим углом, короткая оправка и пр.). Остальные 11 заготовок из группы колец, приведенных в табл. 1, могут быть деформированы с помощью предложенного инструмента.

Штамп для безнасосной гидрораздачи заготовок бандажных колец состоит из блока инструмента, системы заполнения заготовки рабочей жидкостью и системы измерения размеров заготовки и давления рабочей жидкости в процессе деформации кольца.

Блок инструмента состоит из двух конусов, сцентрированных между собой с помощью оправки и втулки. Нижний конус устанавливается на переходной плите прессы 300 МН. Система подачи жидкости состоит из трубопровода, рассчитанного на передачу жидкости под давлением до 400 МПа, обратного клапана и насоса низкого давления (НД), установленного на баке существующего насоса высокого давления (ВД). С помощью насоса НД объем, заключенный между заготовкой и двумя конусами, заполняется жидкостью через обратный клапан. В качестве рабочей жидкости используется смесь воды с эмульсолом, применяемая при работе насоса ВД.

Система измерения размеров состоит из трёх датчиков, расположенных на разных уровнях наружной поверхности заготовки, которые фиксируют текущий диаметр (периметр) наружной поверхности заготовки. Сигналы с датчиков передаются на пульт управления процессом гидрорастяжения.

Величина давления рабочей жидкости в полости заготовки в процессе гидрорастяжения измеряется с помощью электрического манометра, установленного на обратном клапане. Результаты измерения давления передаются на пульт управления. Вместо электрического манометра может быть использован механический на максимальное давление 400 МПа.

Система управления электрическими элементами штампа смонтирована в пульте управления. При подаче питания на схему и включении автоматического выключателя загорается индикатор и одновременно подается питание на усилитель постоянного тока и измерители давления и счетчиков импульсов.

Усилитель подает питание постоянного тока 36 В на электрический манометр высокого давления и одновременно светодиод, излучение которого попадает на фотодиод. Изменение давления на манометре фиксируется на измерителе давления, который показывает текущее значение давления на пульте управления.

При перемещении механизма, перекрывающего излучение светодиода, фотодиод с частотой, определяющейся частотой перемещения механизма, выдает импульсы на счетчик импульсов, который отсчитывает их, показывая на своем дисплее реальное количество импульсов.

Завершение процесса гидрорастяжения определяется по показаниям датчиков размеров заготовки. При достижении наружным диаметром заготовки требуемых размеров ход подвижной траверсы прессы прекращается и траверса поднимается вверх. Ходом рабочего стола штамп выдвигается из-под прессы и упрочнённая заготовка удаляется из штампа.

## ВЫВОДЫ

Разработан способ гидрорастяжения заготовок бандажных колец турбогенераторов без использования насоса высокого давления.

Предложена методика расчёта размеров заготовок, упрочняемых гидрорастяжением. Сделан расчёт размеров группы заготовок бандажных колец, которые будут деформированы предложенным способом в первую очередь.

Разработан рабочий проект штампа для безнасосной гидрораздачи заготовок бандажных колец на прессе 300 МН ОАО «Уралмаш». Сделан расчёт размеров сменных деталей штампа, необходимых для изготовления первоочередной группы заготовок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Прессование металлов жидкостью высокого давления / Л. В. Прозоров, А. А. Костава, В. Д. Ревтов. – М. : Машиностроение, 1972. – 152 с.
2. Высокие давления в современных технологиях обработки материалов / Б. И. Береснев, К. И. Езерский, Е. В. Трушин, Б. И. Каменский; ред. Г. В. Кудрюмова. – М. : Наука, 1988. – 246 с.
3. Лобанов В. К. Гидропрессование – способ повышения работоспособности тяжело нагруженных деталей / В. К. Лобанов, А. А. Гулюк, В. Л. Калюжный // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – № 8. – С. 18–21.
4. Калюжный В. Л. Холодне видавлювання порожнин штампів, прес-форм та лив-форм в умовах високих гідростатичних тисків / В. Л. Калюжный // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 66–69.
5. Технология производства заготовок немагнитных бандажных колец для турбогенераторов из коррозийностойкой стали / В. В. Воинов, Ю. Н. Гойхенберг и др. // Труды I всесоюзной конференции по высокоазотистым сталям. – Киев, 1990. – С. 411–413.
6. Отчет по научно-исследовательской работе «Освоение и внедрение технологии изготовления заготовок немагнитных бандажных колец методом гидрорастяжения на прессе ЗООМН». – НПО ЦНИИТмаш, инв. № 01.88.0066973\*. – М., 1990. – 43 с.

Токарев А. Г. – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник ОАО «Уралмаш»;

Савчинский И. Г. – канд. техн. наук, зав. отделом ОАО «Уралмаш»;

Сивак Р. И. – канд. техн. наук, доц. ВНАУ.

ОАО «Уралмаш» – машиностроительный завод, г. Екатеринбург, Россия.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: sivak\_r\_i@mail.ru