

УДК 621.22

К ВОПРОСУ О ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕЦ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ*

Волков В.П.¹, к.т.н., ведущий инженер
Салихьянов Д.Р.^{1,2}, к.т.н., научный сотрудник кафедры «Обработка металлов давлением» (salenhall@gmail.com)

¹Институт машиноведения УрО РАН
 (620049, Россия, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34)

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
 (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Крупногабаритные кольца, изготавливаемые различными способами обработки металлов давлением, используются во многих отраслях промышленности. Для энергетической промышленности актуальным является производство бандажных колец из немагнитной аустенитной стали для укрепления лобовых частей обмоток роторов турбогенераторов большой единичной мощности. В процессе эксплуатации установки бандажное кольцо является одним из наиболее нагруженных элементов. Вследствие этого материал бандажных колец должен обладать высокими прочностными свойствами, достаточной пластичностью и хорошей магнитной проницаемостью. Деформация колец внутренним давлением является наиболее перспективным и эффективным способом их холодного упрочнения, обеспечивающим благоприятное и равномерное напряженно-деформированное состояние металла при производстве немагнитных бандажных колец мощных турбогенераторов. Поскольку к окончанию процесса холодного упрочнения готовое кольцо должно приобрести конкретные размеры и заданную степень деформации, актуальной задачей является расчет размеров исходного кольца. Существующая методика во многом опирается на опытные данные производства и применима лишь для узкого диапазона колец, что снижает точность расчета и, в конечном счете, приводит к увеличению припусков кольца и снижению коэффициента использования металла. В работе разработана и предложена новая методика расчета исходных размеров колец, в основе которой лежит условие несжимаемости. С учетом заданных краевых условий составлена система из двух уравнений с тремя неизвестными. Для решения неполной системы уравнений предложено ввести дополнительные уравнения: в первом варианте методики использовано известное решение А. Надаи, во втором – условие постоянства относительной толщины стенки кольца, допустимое исходя из опытных данных деформирования колец разных размеров. Результаты расчета размеров исходных колец по обеим предложенным методикам были сопоставлены с опытными данными. Максимальное расхождение не превышает 4 %, а среднее значение не превышает 1 %, что указывает на достаточно высокую точность предложенных методик расчета и возможность использования их в производственной практике.

Ключевые слова: бандажное кольцо, раздача колец внутренним давлением, гидрораздача, холодное упрочнение, холодная деформация, математическая модель.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-195-200

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается процесс деформации кольца под действием внутреннего давления, поскольку это имеет большое значение в производстве немагнитных бандажных колец мощных турбогенераторов [1 – 19]. Раздача колец внутренним давлением, наряду с другими способами, например, раздачей путем внедрения многосекционного инструмента, обеспечивает благоприятное напряженно-деформированное состояние металла кольца и равномерное распределение деформации по его внутренней поверхности. Одной из актуальных задач является создание методики расчета размеров заготовки до деформации по известным размерам после деформации и с заданной степенью деформации. Существующая методика [3] не обеспечивает высокой точности расчетов и применима лишь

к ограниченному диапазону типоразмеров колец, а, следовательно, погрешности приходится компенсировать излишними припусками.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В работе под термином «кольцо» подразумевается осесимметричная металлическая заготовка, у которой внутренний и наружный диаметр, а также высота сопоставимы между собой. В качестве краевого условия к задаче задается тангенциальная деформация ε_δ на контуре известного диаметра δ_1 :

$$d_1 < \delta_1 < \frac{D_1 - d_1}{2}, \quad (1)$$

где индекс «1» означает размеры после деформации. Кроме того, считаем, что высотная деформация ε_z не зависит от радиальной координаты. Смысл краевого условия заключается в том, что по нему контролируется уровень качества металла кольца.

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

Известно, что пластическая деформация постепенно охватывает весь объем кольца и сопровождается следующими эффектами:

- наружный и внутренний диаметры D и d увеличиваются;
- высота H и размер стенки $\frac{D-d}{2}$ уменьшаются;
- подобие формы кольца сохраняется за весь процесс деформации.

В основу расчета закладывается условие несжимаемости, которое запишем отдельно для двух частей кольца, разграниченных контуром δ_1 :

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{\delta_1 + d_1}{\delta + d}\right) + \ln\left(\frac{\delta_1 - d_1}{\delta - d}\right) + \ln\left(\frac{H_1}{H}\right) &= 0; \\ \ln\left(\frac{D_1 + \delta_1}{D + \delta}\right) + \ln\left(\frac{D_1 - \delta_1}{D - \delta}\right) + \ln\left(\frac{H_1}{H}\right) &= 0; \quad (2) \\ \varepsilon_\delta &= \ln\left(\frac{\delta_1}{\delta}\right). \end{aligned}$$

Геометрически это означает, что записаны уравнения для трех точек $\frac{\delta + d}{2}$, $\frac{D + \delta}{2}$, δ в меридиональном сечении кольца (рис. 1), деформации в которых непосредственно измерить нельзя. Поскольку величины ε_δ и δ_1 заданы, то величину δ можно считать уже известной. Таким образом, имеем два уравнения с тремя неизвестными d, D, H . Система является неполной, поэтому необходимо найти дополнительное уравнение. Для этого обратимся к известному решению [20]

$$\varepsilon_\phi = \frac{C}{r^2} - \frac{\varepsilon_z}{2}, \quad (3)$$

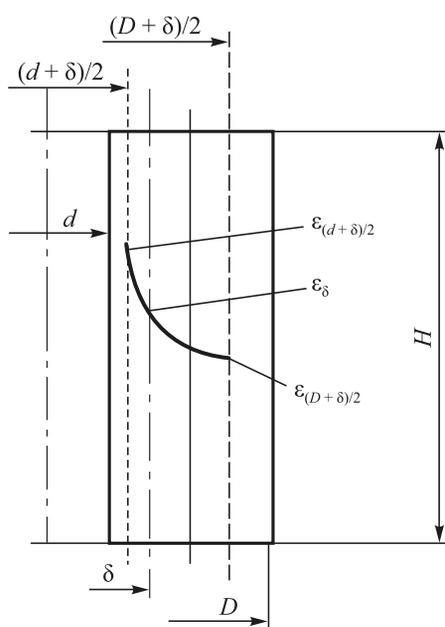


Рис. 1. Геометрическая интерпретация системы уравнений (2)

Fig. 1. Geometric interpretation of the system of equations (2)

где C – постоянная интегрирования.

На контуре $r = \frac{\delta_1}{2}$ деформация ε_ϕ должна быть равна ε_δ , а высотная деформация ε_z при $z = H_1$ равна $\ln\left(\frac{H_1}{H}\right)$.

Тогда постоянная C определится из соотношения

$$C = \frac{\delta_1^2}{4} \left[\ln\left(\frac{\delta_1}{\delta}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{H_1}{H}\right) \right]; \quad (4)$$

$$\varepsilon_\phi = \left(\frac{\delta_1}{2r}\right)^2 \ln\left(\frac{\delta_1}{\delta}\right) + \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\delta_1}{2r}\right)^2 - 1 \right] \ln\left(\frac{H_1}{H}\right). \quad (5)$$

В частности, для внутреннего и наружного контуров кольца имеем, соответственно:

$$\varepsilon_d = \ln\left(\frac{d_1}{d}\right) = \left(\frac{\delta_1}{d_1}\right)^2 \ln\left(\frac{\delta_1}{\delta}\right) + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta_1}{d_1}\right)^2 - 1 \right] \ln\left(\frac{H_1}{H}\right); \quad (6)$$

$$\varepsilon_D = \ln\left(\frac{D_1}{D}\right) = \left(\frac{\delta_1}{D_1}\right)^2 \ln\left(\frac{\delta_1}{\delta}\right) + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta_1}{D_1}\right)^2 - 1 \right] \ln\left(\frac{H_1}{H}\right). \quad (7)$$

Любое из уравнений (6) или (7) может доопределить систему (2), однако в таком случае кривая $\varepsilon_\phi(r)$ не проходит через все пять точек $\frac{\delta + d}{2}$, $\frac{D + \delta}{2}$, d, D и δ (рис. 2) и, следовательно, снижается точность расчета. Поэтому эти уравнения должны быть связаны между собой, например, простейшей разностью:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{d_1}{d}\right) - \ln\left(\frac{D_1}{D}\right) &= \left[\left(\frac{\delta_1}{d_1}\right)^2 - \left(\frac{\delta_1}{D_1}\right)^2 \right] \ln\left(\frac{\delta_1}{\delta}\right) - \\ &- \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta_1}{d_1}\right)^2 - \left(\frac{\delta_1}{D_1}\right)^2 \right] \ln\left(\frac{H_1}{H}\right). \quad (8) \end{aligned}$$

Таким образом, система (2) дополнена соотношением (8).

Опуская целый ряд несложных преобразований полной системы – исключение из уравнений величины $\ln\left(\frac{H_1}{H}\right)$, потенцирование, переход к безразмерным переменным и другие, приходим к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{x^2 - 1}{1 - y^2} &= \frac{x_1^2 - 1}{1 - y_1^2}, \\ \frac{x^2}{y^2} &= \frac{x_1^2}{y_1^2} \left(\frac{\delta_1}{\delta}\right)^4 \left(\frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{x_1^2}\right) \left(\frac{1 - y^2}{1 - y_1^2}\right) - \left(\frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{x_1^2}\right), \quad (9) \end{aligned}$$

где $x = \frac{D}{\delta}$; $x_1 = \frac{D_1}{\delta_1}$; $y = \frac{d}{\delta}$; $y_1 = \frac{d_1}{\delta_1}$.

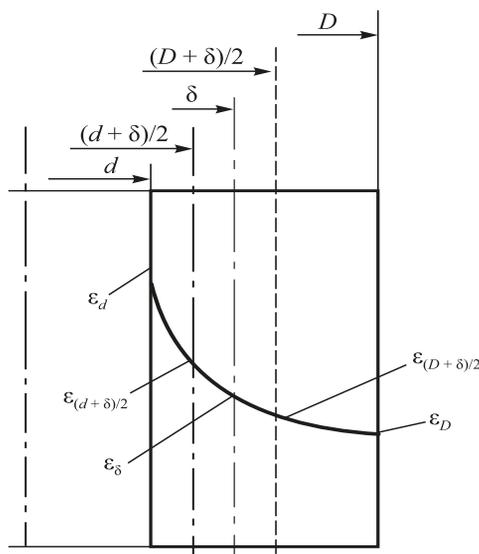


Рис. 2. Геометрическая интерпретация системы уравнений (2), дополненной уравнением (8)

Fig 2. Geometric interpretation of the system of equations (2) supplemented by equation (8)

Система (9) еще несколько упрощается введением постоянных

$$C_1 = \frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{x_1^2}; C_2 = \frac{x_1^2}{y_1^2} \left(\frac{\delta_1}{\delta} \right)^{4C_1} (1 - y_1^2)^{C_1}; C_3 = \frac{x_1^2 - 1}{1 - y_1^2},$$

тогда получаем

$$\frac{x^2 - 1}{1 - y^2} = C_3;$$

$$\frac{x^2}{y^2} = C_2 \left(\frac{1}{1 - y^2} \right)^{C_1}. \quad (10)$$

В этой системе, избавляясь от x^2 и обозначая $y^2 = u$, получим одно нелинейное алгебраическое уравнение относительно одной неизвестной:

$$u = 1 - \frac{C_2 u \left(\frac{1}{1 - u} \right)^{C_1} - 1}{C_3}. \quad (11)$$

Корни таких уравнений находим методом итераций. Для начала итераций необходимо определить порядок величины $u = y^2 = \left(\frac{d}{\delta} \right)^2 < 1$. Это можно сделать по величине $y_1^2 = \left(\frac{d_1}{\delta_1} \right)^2 < 1$. Если, например, $y_1 = 0,95$, то $y_1^2 = 0,9025$ и можно полагать $u^{(1)} = 0,90 - 0,91$.

Такие расчеты были произведены, а затем вновь перешли к переменной y (см. таблицу, поле δ) для целого ряда типоразмеров колец. Погрешность между опыт-

ными и расчетными значениями показана в поле 10 таблицы. Наряду с общим благоприятным фоном, имеются некоторые расчетные результаты, ошибка которых составляет 3 – 4 %. Наличие таких расхождений не совсем ясно. Однако в любом случае необходимо совершенствовать методику. В частности, попытаться отыскать частный, характерный только для рассматриваемой деформации, закон сохранения, независимый от уравнения несжимаемости. Тщательный анализ опытных данных показал, что такой закон существует, а именно, относительный размер стенки кольца $\frac{D-d}{H}$ сохраняется за весь процесс деформации. На рис. 3 показана корреляция относительных размеров стенки до и после деформации, что позволяет дополнить (с малой ошибкой) основную систему уравнений соотношением

$$\frac{D-d}{2H} = \frac{D_1-d_1}{2H_1}, \quad (12)$$

которое в дальнейшем будем называть условием постоянства относительного размера стенки кольца.

Очевидно, это равенство является прямым следствием подобия колец за весь процесс деформации. Преобразуя его, как указано выше, получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$\frac{x^2 - 1}{x_1^2 - 1} = \frac{1 - y^2}{1 - y_1^2};$$

$$\left(\frac{\delta_1}{\delta} \right)^3 \frac{x_1 - y_1}{x - y} = \frac{x^2 - 1}{x_1^2 - 1}. \quad (13)$$

Избавляясь от переменной x^2 , получаем одно нелинейное уравнение с одной неизвестной:

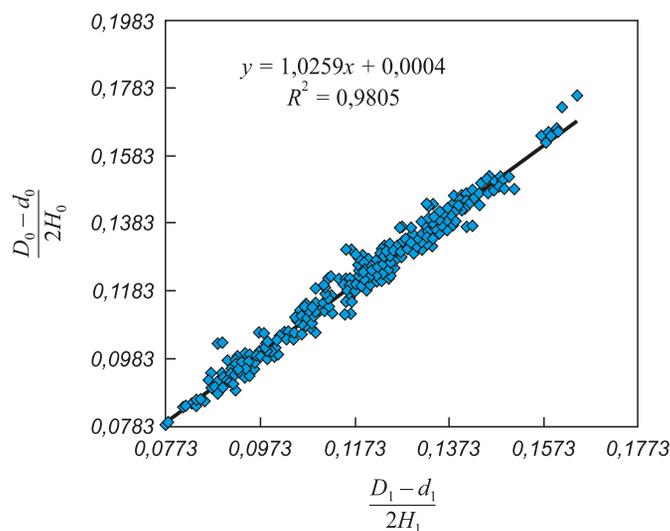


Рис. 3. Корреляция относительных размеров стенки кольца до и после гидрорастворения

Fig. 3. Correlation of the relative wall thickness dimensions of the ring before and after hydrostretching

Опытные и расчетные значения параметров

Experimental and calculated parameters values

Номер п/п	Фрагмент базы данных (опытные значения)					Расчетные значения		Погрешность	
	Номер типоразмера	y_1	y_1^2	y	y^2	$y_{расч. по формуле (14)}$	$y_{расч. по формуле (11)}$	$\Delta y/y, \%$ поле 7	$\Delta y/y, \%$ поле 8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	435	0,9517	0,9058	0,9186	0,8438	0,9142	0,9177	0,48	0,09
2	624	0,9539	0,9098	0,9276	0,8605	0,9274	0,9271	0,02	0,05
3	845	0,9535	0,9092	0,9332	0,8709	0,9337	0,9335	0,05	0,03
4	971	0,9503	0,9031	0,9231	0,8521	0,9335	0,9336	1,13	0,05
5	991	0,9589	0,9195	0,9081	0,8247	0,9364	0,9345	3,11	2,91
6	993	0,9524	0,9070	0,9169	0,8408	0,9212	0,9228	0,47	0,44
7	994	0,9225	0,8510	0,8970	0,8045	0,8843	0,8942	1,43	0,31
8	997	0,9124	0,8325	0,8855	0,7841	0,9146	0,9161	3,28	3,46
9	066	0,9523	0,9069	0,9348	0,8739	0,9322	0,9346	0,28	0,02
10	067	0,9394	0,8824	0,9139	0,8352	0,9143	0,9243	0,04	1,14
11	112	0,9628	0,9270	0,9305	0,8659	0,9449	0,9431	1,54	1,35
12	114	0,9564	0,9147	0,9273	0,8600	0,9298	0,9259	0,27	0,15
13	115	0,9699	0,9408	0,9569	0,9157	0,9574	0,9558	0,05	0,11
14	123	0,9651	0,9314	0,9550	0,9121	0,9507	0,9544	0,45	0,06
15	124	0,9566	0,9152	0,9269	0,8591	0,9290	0,9272	0,22	0,03
16	156	0,9511	0,9045	0,9245	0,8548	0,9219	0,9160	0,28	0,92
17	182	0,9445	0,8921	0,9140	0,8355	0,9253	0,9262	1,23	1,33
18	183	0,9564	0,9148	0,9328	0,8701	0,9450	0,9411	1,30	0,89
19	273	0,9566	0,9152	0,9315	0,8677	0,9380	0,9368	0,69	0,57
20	296	0,9540	0,9101	0,9315	0,8678	0,9295	0,9308	0,21	0,08
21	297	0,9478	0,8984	0,9296	0,8641	0,9400	0,9347	1,12	0,55
22	298	0,9581	0,9180	0,9371	0,8781	0,9337	0,9357	0,36	0,15
23	299	0,9574	0,9167	0,9386	0,8809	0,9414	0,9309	0,29	0,82
24	300	0,9697	0,9403	0,9338	0,8719	0,9547	0,9541	2,23	2,17
25	302	0,9586	0,9190	0,9305	0,8658	0,9380	0,9381	0,80	0,82
26	303	0,9632	0,9277	0,9261	0,8577	0,9381	0,9384	1,29	1,33
27	310	0,9410	0,8854	0,9705	0,9418	0,9513	0,9411	2,02	3,03
28	332	0,9601	0,9217	0,9293	0,8636	0,9349	0,9377	0,60	0,90
29	359	0,9436	0,8905	0,9143	0,8360	0,9205	0,9198	0,68	0,60
30	388	0,9575	0,9169	0,9355	0,8751	0,9400	0,9401	0,48	0,50
31	437	0,9460	0,8949	0,9200	0,8464	0,9237	0,9296	0,40	1,04
32	447	0,9433	0,8898	0,8967	0,8040	0,9074	0,8936	1,19	0,35
33	483	0,9356	0,8753	0,8980	0,8065	0,9113	0,9155	1,48	1,95
34	546	0,9543	0,9106	0,9286	0,8623	0,9350	0,9337	0,70	0,55
35	555	0,9570	0,9159	0,9292	0,8634	0,9296	0,9288	0,04	0,04
36	610	0,9489	0,9005	0,9267	0,8588	0,9225	0,9233	0,46	0,37
37	617	0,9685	0,9379	0,9145	0,8363	0,9485	0,9467	3,72	3,52
38	634	0,9532	0,9085	0,9339	0,8722	0,9227	0,9295	0,45	0,47
39	696	0,9198	0,8461	0,8937	0,7988	0,8893	0,8938	0,49	0,01
40	718	0,9128	0,8333	0,8992	0,8085	0,9044	0,9011	0,57	0,21
41	719	0,9581	0,9179	0,9334	0,8713	0,9322	0,9320	0,13	0,15
42	755	0,9054	0,8197	0,8604	0,7403	0,8412	0,8509	2,28	1,10
43	792	0,9565	0,9149	0,9352	0,8746	0,9350	0,9415	0,02	0,67
44	906	0,9609	0,9233	0,9327	9,8699	0,9356	0,9342	0,31	0,16
Средняя ошибка по всем типоразмерам колец, %								0,88	0,81

$$y = \sqrt{1 + C_1(1 - y)^2} - \frac{C_2}{1 - y^2}, \quad (14)$$

где

$$C_1 = \frac{x_1^2 - 1}{1 - y_1^2}; \quad C_2 = \left(\frac{\delta_1}{\delta}\right)^3 (x_1 - y_1)(1 - y_1^2).$$

Расчеты по этому уравнению показаны в таблице (поле 7).

Выводы

Сравнение двух расчетных методов показывает, что использование условия подобия (12) совместно с условием несжимаемости дает погрешность не более, чем использование условия несжимаемости совместно с решением А. Надаи, что позволяет сделать вывод о равноценности двух методик и рекомендовать их для практического применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Готлиб Б.М., Вакалюк А.А. Производство бандажных колец мощных турбогенераторов: технология и управление // Фундаментальные исследования. 2011. № 12. С. 96 – 101.
2. Готлиб Б.М., Вакалюк А.А. Автоматизация процесса гидрорастяжения бандажных колец большого диаметра // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2013. № 3 (19). С. 18 – 33.
3. Токарев А.Г., Савчинский И.Г., Сивак Р.И. Деформационное упрочнение заготовок бандажных колец турбогенераторов мощностью 500 МВт // Обработка металлов давлением. 2010. № 4 (25). С. 94 – 98.
4. Колупицкий К.А. Этапы модернизации конструкции роторных бандажей турбогенераторов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2016. № 9. С. 38 – 41.
5. Wang Zh., Ning X., Meng Q. etc. A new insight into manufacturing fine-grained heavy retaining rings // Materials and design. 2016. Vol. 103. P. 152 – 159.
6. Surzhenko I., Glavatska N., Berns H. Texture formation and anisotropy of mechanical properties of retaining rings made of austenitic CrMnN steel // Mat. – wiss. U. Werkstofftech. 2005. No. 2 (36). P. 51 – 55.
7. Готлиб Б. М., Вакалюк А. А. Нечеткое регулирование процесса гидрорастяжения бандажных колец большого диаметра на гидравлическом прессе усилием 300 МН // Вестник УГТУ. 2012. Т. 16. № 2 (48). С. 70 – 75.
8. Li F., Zhang H., He W. etc. Compression and tensile consecutive deformation behavior of Mn18Cr18N austenite stainless steel // Jinshu Xuebao / Acta Metallurgica Sinica. 2016. Vol. 52 (8). P. 956 – 964.
9. Wang Z.H., Sun S.H., Wang B. etc. Importance and role of grain size in free surface cracking prediction of heavy forgings // Material Science Engineering A. 2015. Vol. 625. P. 321 – 330.
10. Wang Zh., Fu W., Sun Sh. Effect of preheating temperature on surface cracking of high nitrogen CrMn austenitic stainless steel // Journal of Materials Science & Technology. 2010. Vol. 26(9). P. 798 – 802.
11. Olmi G., Freddi A. LCF on turbogenerator rotors and coil retaining rings: material characterization and sensitivity analyses // The European Physical Journal Conferences. 2010. Vol. 6. P. 1 – 9.
12. Ren Y.L., Niu L.J., Ren J., Qi Z.Y. Dimension and property prediction of retaining ring in hydraulic expansion // Suxing gongcheng xuebao. 2014. Vol. 21(6). P. 1 – 6.
13. Olmi G., Freddi A. Reliability assessment of a turbogenerator coil retaining ring based on low cycle fatigue data // Archive of mechanical engineering. 2014. No. 1. P. 5 – 34.
14. Balyts'kyi O.I. Corrosion-mechanical characteristics of the materials of nonmagnetic shroud rings of turbogenerators. I. 8Mn-8Ni-4Cr and 18Mn-4Cr steels // Materials Science. 1997. Vol. 33(4). P. 539 – 552.
15. Balyts'kyi O.I. Corrosion-mechanical characteristics of the materials of nonmagnetic retaining rings of turbogenerators. II. High-nitrogen 18Mn-18Cr steels // Materials Science. 1998. Vol. 34(1). P. 97 – 109.
16. Balyts'kyi O.I. Corrosion-mechanical characteristics of the materials of nonmagnetic retaining rings of turbogenerators. III. Crack formation in the course of service // Materials Science. 1998. Vol. 34(2). P. 279 – 287.
17. Sherlock T.P., Jirinec M.J. Failure of non-magnetic retaining ring in a high-speed generator rotor. Handbook of case histories in failure analysis / K.A. Esakul. Vol. 2. – ASM International, 1992. – 525 p.
18. Orita K., Ikeda Ya., Iwadate T., Ishizaka J. Development and production of 18Mn-18Cr non-magnetic retaining ring with high yield strength // ISIJ International. 1990. Vol. 30(8). P. 587 – 593.
19. Унксов Е.П., Джонсон У., Колмогоров В.Л. Теория пластических деформаций металлов / Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
20. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел / Пер с англ. под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Иностранная литература, 1954. – 647 с.

Поступила в редакцию 10 ноября 2017 г.

После доработки 11 января 2018 г.

Принята к публикации 25 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 3, pp. 195–200.

ON RING DEFORMATION BY INTERNAL PRESSURE

V.P. Volkov¹, D.R. Salikhyanov^{1,2}

¹Institute of Engineering Science, RAS (Ural Branch), Ekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Large-sized rings, manufactured by various methods of metal forming, are used in many industries. For the power industry, it is relevant to manufacture of retaining rings made of non-magnetic austenitic steel in order to strengthen the winding frontal parts of the rotors of turbine-type generators of a large unit capacity. In the process of generator operating, the retaining ring is one of the most loaded elements.

As a result, material of retaining rings should have high strength properties, sufficient plasticity and good magnetic inductivity. Deformation of rings by internal pressure is the most promising and effective way of their cold hardening, providing a favorable and uniform stress-strain state of the metal in the manufacture of non-magnetic retaining rings for powerful turbine-type generators. Since the finished ring must acquire specific dimensions and a specified deformation degree in the process of cold hardening, the urgent task is calculation of the billet dimensions. The existing calculation procedure relies heavily on experimental manufacture data and is applicable only to a narrow range of rings, which reduces the accuracy of calculation and, ultimately, leads to an increase in ring allowances and a decrease in the metal utilization factor. In this research work a new technique for calculating the initial

dimensions of rings, which is based on the incompressibility condition was developed and proposed. Taking into account the assumed boundary conditions, a system of two equations with three terms is compiled. To solve an incomplete equation system, it was suggested to introduce additional equations – in first version of the technique, the well-known solution of Nadai was used. In the second version – the condition of constancy of relative thickness of the ring wall permissible from the experimental data of deformation of rings of different sizes was used. The results of calculating the rings initial dimensions for both proposed techniques were compared with the experimental data. The maximum deviation from experimental data does not exceed 4 % and the deviation average value does not exceed 1 %, which indicates a sufficiently high accuracy of the proposed calculation techniques and the possibility of using them in manufacturing practice.

Keywords: retaining ring, ring expansion by internal pressure, hydrostretching, cold hardening, cold deformation, mathematical model.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-195-200

REFERENCES

1. Gotlib B.M., Vakalyuk A.A. Manufacture of retaining ring for powerful turbo-generators: technology and control. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2011, no. 12, pp. 96–101. (In Russ.).
2. Gotlib B.M., Vakalyuk A.A. Automation of the hydrostretching process of large diameter retaining rings. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2013, no. 3 (19), pp. 18–33. (In Russ.).
3. Tokarev A.G., Savchinskii I.G., Sivak R.I. Strain hardening of billets of turbogenerator retaining rings with a capacity of 500 MW. *Obrabotka metallov davleniem*. 2010, no. 4 (25), pp. 94–98. (In Russ.).
4. Kolupitskii K.A. Stages of design modernization of turbogenerator rotor bandages. *Izvestiya SPBGETU LETI*. 2016, no. 9, pp. 38–41. (In Russ.).
5. Wang Zh., Ning X., Meng Q. etc. A new insight into manufacturing fine-grained heavy retaining rings. *Materials and design*. 2016, vol. 103, pp. 152–159.
6. Surzhenko I., Glavatska N., Berns H. Texture formation and anisotropy of mechanical properties of retaining rings made of austenitic CrMnN steel. *Mat. – wiss. U. Werkstofftech*. 2005, no. 2 (36), pp. 51–55.
7. Gotlib B. M., Vakalyuk A. A. Ill-defined regulation of hydrostretching process of large diameter retaining rings on a hydraulic press with a force of 300 MN. *Vestnik UGATU*. 2012, vol. 16, no. 2 (48), pp. 70–75. (In Russ.).
8. Li F., Zhang H., He W. etc. Compression and tensile consecutive deformation behavior of Mn18Cr18N austenite stainless steel. *Jinshu Xuebao /Acta Metallurgica Sinica*. 2016, vol. 52 (8), pp. 956–964.
9. Wang Z.H., Sun S.H., Wang B. etc. Importance and role of grain size in free surface cracking prediction of heavy forgings. *Material Science Engineering A*. 2015, vol. 625, pp. 321–330.
10. Wang Zh., Fu W., Sun Sh. Effect of preheating temperature on surface cracking of high nitrogen CrMn austenitic stainless steel. *Journal of Materials Science & Technology*. 2010, vol. 26(9), pp. 798–802.
11. Olmi G., Freddi A. LCF on turbogenerator rotors and coil retaining rings: material characterization and sensitivity analyses. *The European Physical Journal Conferences*. 2010, vol. 6, pp. 1–9.
12. Ren Y.L., Niu L.J., Ren J., Qi Z.Y. Dimension and property prediction of retaining ring in hydraulic expansion. *Suxing gongcheng xuebao*. 2014, vol. 21(6), pp. 1–6.
13. Olmi G., Freddi A. Reliability assessment of a turbogenerator coil retaining ring based on low cycle fatigue data. *Archive of mechanical engineering*. 2014, no. 1, pp. 5–34.
14. Balyts'kyi O.I. Corrosion-mechanical characteristics of the materials of nonmagnetic shroud rings of turbogenerators. I. 8Mn-8Ni-4Cr and 18Mn-4Cr steels. *Materials Science*. 1997, vol. 33(4), pp. 539–552.
15. Balyts'kyi O.I. Corrosion-mechanical characteristics of the materials of nonmagnetic retaining rings of turbogenerators. II. High-nitrogen 18Mn-18Cr steels. *Materials Science*. 1998, vol. 34(1), pp. 97–109.
16. Balyts'kyi O.I. Corrosion-mechanical characteristics of the materials of nonmagnetic retaining rings of turbogenerators. III. Crack formation in the course of service. *Materials Science*. 1998, vol. 34(2), pp. 279–287.
17. Sherlock T.P., Jirinec M.J. *Failure of Non-Magnetic Retaining Ring in a High-Speed Generator Rotor. Handbook of Case Histories in Failure Analysis*. Esakul K.A. ed. Vol. 2. ASM International, 1992, 525 p.
18. Orita K., Ikeda Ya., Iwadata T., Ishizaka J. Development and production of 18Mn-18Cr non-magnetic retaining ring with high yield strength. *ISIJ International*. 1990, vol. 30(8), pp. 587–593.
19. Unksov E.P., Johnson W., Kolmogorov V.L. *Teoriya plasticheskikh deformatsii metallov* [Theory of metals plastic deformation]. Unksov E.P., Ovchinnikov A.G. eds. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 598 p. (In Russ.).
20. Nadai A.L. *Theory of flow and fracture of solids*. Vol. 1. New York: McGraw-Hill, 1950. (Russ. ed.: Nadai A. *Plastichnost' i razrushenie tverdykh tel. T. 1*. Moscow: Mir, 1969, 864 p.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the Resolution no. 211 of the Government of the Russian Federation, Contract no. 02.A03.21.0006.

Information about the authors:

V.P. Volkov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Engineer

D.R. Salikhyanov, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Chair "Metal Forming" (salenhall@gmail.com)

Received November 10, 2017

Revised January 11, 2018

Accepted December 25, 2018