



*Analysis of elastic characteristics of spherulitic iron O-rings for turbocompressors received from billets by chill casting and in water-cooled mold by continuous cyclic freezing is carried out.*

А. М. БОДЯКО, С. В. ГАЛАГАЕВ, ИТМ НАН Беларуси

## АНАЛИЗ УПРУГИХ СВОЙСТВ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ ИЗ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

УДК 621.74.047+62—762.444:539.319

Долговечность турбокомпрессоров, являющихся одним из важнейших агрегатов современных форсированных дизельных двигателей, в большой степени определяется герметичностью уплотнения ротора в корпусе, которое выполняется с помощью разрезных колец. Эти кольца должны одновременно обладать высокой упругостью и износостойкостью при достаточной пластичности, чему в наибольшей степени удовлетворяет чугун с шаровидным графитом (ЧШГ). На свойства изделий из ЧШГ большое влияние оказывают особенности первичной структуры заготовок, формирующейся в процессе литья, в частности, размеры и расположение включений графита, изменить которые впоследствии уже не представляется возможным. Для решения задачи получения высококачественных заготовок из ЧШГ перспективным представляется использование специальных способов литья, в частности методов литья в металлические формы, позволяющих существенно повысить качество отливок и стабильность технологического процесса. Разработанная оснастка, технология литья и применение колец достаточно подробно рассмотрены в [1—3]. В настоящей статье основное внимание уделено анализу свойств уплотнительных колец, изготовленных с использованием метода термофиксации. Эта технология в отличие от обработки по копиру обладает большей технологической гибкостью и позволяет выпускать кольца широкой номенклатуры в условиях неспециализированного производства на универсальном металлорежущем оборудовании.

Заготовки для колец получали на литейном участке ИТМ НАН Беларуси в кокилях и водоохлаждаемом кристаллизаторе методом непрерывно-циклического намораживания. Термофиксацию предварительно обработанных колец проводили на клине или трубной оправке в нагревательной печи в воздушной атмосфере. Периодически контролировали свойства готовых изделий, отбирая по 10 колец каждого типоразмера из партии.

Анализ результатов статистической обработки показал, что наиболее высокая стабильность регламентируемых по ТУ параметров, диаметральной

силы сжатия ( $Q$ ) и ширины зазора в замке в свободном состоянии ( $\delta$ ) характерна для колец диаметром 23 и 29,6 мм (стандартные отклонения малы). Регрессионная обработка экспериментальных данных позволила получить линейные модели зависимости  $Q = f(\delta)$  при доверительной вероятности  $q = 99\%$  для колец диаметром 13, 18, 29,6 мм и при  $q = 90\%$  для колец диаметром 23 мм.

Для колец диаметром 13 мм ( $0,6 < \delta < 2,05$  мм)

$$Q = 3,532 + 7,552\delta, \quad (1)$$

для колец диаметром 18 мм ( $1,1 < \delta < 1,9$  мм)

$$Q = -2,792 + 14,712\delta, \quad (2)$$

для колец диаметром 23 мм ( $2,4 < \delta < 3,1$  мм)

$$Q = 8,221 + 4,88\delta, \quad (3)$$

для колец диаметром 29,6 мм ( $3,4 < \delta < 4,3$  мм)

$$Q = 17,697 + 2,716\delta. \quad (4)$$

Из (1)—(4) видно, что интенсивность влияния  $\delta$  на  $Q$ , которая определяется углом наклона соответствующих прямых, различна для колец разного диаметра. Наиболее быстро величина диаметральной силы возрастает с увеличением  $\delta$  для колец диаметром 18 мм и несколько медленнее для колец диаметром 13 мм. Видимо, для этих колец контроль величины  $\delta$  как фактор обеспечения требуемых упругих свойств необходим в большей степени. Аналогичная зависимость для колец диаметром 23 мм выражена слабее и менее всего она проявляется для колец диаметром 29,6 мм. Для более полного анализа полученных результатов проведем оценку зависимости диаметральной силы сжатия от зазора в замке с использованием методов сопротивления материалов. Это допустимо, так как материал кольца при оценке  $Q$  работает в пределах упругости. Поскольку радиус уплотнительного кольца почти на порядок (в 7—9 раз для колец разного типоразмера) превышает высоту сечения, при расчете допустимо применить модель бруса малой кривизны. Для случая прямого изгиба, используя интеграл Мора [3], находим перемещение точки на торцевой повер-

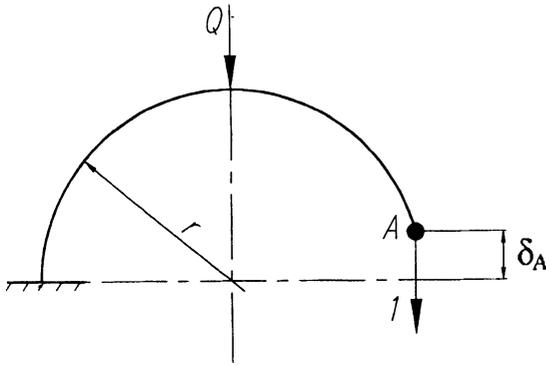


Схема нагружения кольца

ности замка ( $\delta_A$ ) в направлении действия силы  $Q$  (см. рисунок):

$$\delta_A = \int_l \frac{M_Q M_1}{EJ} dy = \frac{Qr^3 \left(1 + \frac{\pi}{4}\right)}{EJ}. \quad (5)$$

Откуда, принимая во внимание, что расчет проводился только для одной половины кольца, находим величину диаметральной силы сжатия, обеспечивающей перемещение, равное зазору в замке кольца в свободном состоянии:

$$Q = \frac{\delta EJ}{2r^3 \left(1 + \frac{\pi}{4}\right)}, \quad (6)$$

где  $E$  — модуль упругости Юнга, Па;  $J$  — момент инерции сечения относительно оси, параллельной оси кольца,  $m^4$ ;  $r$  — радиус кривизны в центре тяжести сечения, м.

Из выражения (6) следует, что диаметральная сила сжатия кольца каждого размера прямо пропорциональна величине зазора в замке в свободном состоянии. Это указывает на то, что наблюдаемая при обработке экспериментальных данных значимая положительная корреляция между этими параметрами имеет физический смысл. Дополнительные сведения о свойствах материала колец может дать оценка относительной величины  $Q$  при использовании в качестве единицы отсчета характеристик кольца диаметром 13 мм. Если допустить, что свойства материала колец одинаковы, а зазоры в замке соответствуют средним по ТУ значениям, то из (6) получим, что диаметральная сила сжатия кольца диаметром 18 мм составит 129 %, кольца диаметром 23 мм — 114 %, а кольца диаметром 29,6 мм — 132 % от величины  $Q$  для кольца диаметром 13 мм. Эти значения несколько отличаются от аналогичных соотношений, найденных из анализа экспериментальных данных. Экспериментальные значения превышают расчетные, причем это превышение составляет 9 % для колец диаметром 18 мм, 8 % для колец диаметром 23 мм и 20 % для колец диаметром 29,6 мм. Сопоставление полученных данных показывает,

что в наименьшей степени упругие свойства ЧШГ используются в кольцах диаметром 13 мм, несколько лучше и почти одинаково в кольцах диаметром 18 и 23 мм и наиболее полно в кольцах диаметром 29,6 мм. Возможной причиной этого может быть то, что, согласно применяемой технологии, припуски по наружному диаметру для колец всех размеров почти одинаковы и составляют 2,5–3,5 мм. Однако оценивать величину припуска ( $t$ ) правильнее относительно радиуса ( $R$ ) кольца по аналогии с понятием приведенной толщины стенки отливки. Отношение  $t/R$  для колец диаметром 13, 18, 23 и 29,6 мм соответственно равно 0,54, 0,36, 0,28 и 0,20. Анализ полученных соотношений показывает, что наилучшие условия для достижения высоких свойств за счет использования преимуществ специальных способов литья в металлические формы создаются для колец диаметром 23 и 29,6 мм, а наихудшие — для колец диаметром 13 мм. Если применить соотношение припуск—радиус кольца, имеющее место при изготовлении колец диаметром 13 мм для остальных изделий, то диаметры необходимых литых заготовок соответственно составят 28, 35 и 45 мм. Это аналогично тому, как если бы кольца диаметром 18 мм получали из заготовок, предназначенных для колец диаметром 23 мм, кольца диаметром 18 мм — из заготовок для колец диаметром 29,6 мм, а последние — из заготовок диаметром 45 мм, что естественно не имеет место. В этом, видимо, кроется одна из причин более низкой упругости колец диаметром 13 мм. Поэтому для повышения их механических свойств необходимо изменить размеры используемых литых заготовок, взяв за основу соотношение  $t/R$ , характерное для колец диаметром 23 и 29,6 мм. Из этого условия кольца диаметром 13 и 18 мм предпочтительнее получать из заготовок диаметром 16 и 23 мм соответственно.

Используя выражение (6) и задаваясь измеренными значениями  $\delta$ , можно также оценить эффективную величину модуля упругости  $E$  материала колец. Оказалось, что для колец диаметром 18, 23 и 29,6 мм средние величины  $E$  соответственно равны 149, 140 и 145 ГПа. Полученные значения отличаются высокой кучностью, что может служить подтверждением стабильности используемой технологии. В то же время для колец диаметром 13 мм значение  $E$  составляет всего 122 ГПа. Это еще раз указывает на существенные резервы, имеющиеся в совершенствовании технологии изготовления колец малого диаметра.

Выражение (6) может также служить для прогноза минимальных значений  $\delta$ , обеспечивающих достижение заданных по ТУ упругих характеристик колец. Для этого перепишем его в виде

$$\delta_{\min} = \frac{2r^3 \left(1 + \frac{\pi}{4}\right) Q_{\min}}{EJ}, \quad (7)$$

Таблица 1.

Номинальный диаметр кольца, мм	Ширина сечения $b$ , мм	Высота сечения $h$ , мм	Зазор в замке $\delta$ , мм	Диаметральная сила сжатия $Q$ , Н
13	1,6 $_{-0,01}$	0,08 $\pm 0,06$	1,2–2,0	$\geq 16,7$
18	1,6 $_{-0,01}$	1,12 $\pm 0,06$	1,5–2,5	$\geq 19,6$
23	1,8 $_{-0,01}$	1,2 $\pm 0,05$	2,5–3,0	$\geq 22,5$
29,6	1,8 $_{-0,04}^{-0,01}$	1,5 $\pm 0,08$	3–4	$\geq 26,5$

где  $Q_{\min}$  — минимально допустимое по ТУ значение диаметральной силы сжатия. Примем, что  $E$  для ЧШГ в кольцах диаметром 18, 23 и 29,6 мм составляет 140 ГПа, а для колец диаметром 13 мм — 120 ГПа, что соответствует минимальным оценкам  $E$  по экспериментальным данным. Из (7) получаем, что значения  $d_{\min}$  для колец диаметром 13, 18, 23 и 29,6 мм равны 1,7, 1,6, 2,9 и 3,7 мм. Сопоставление полученных результатов с требованиями ТУ (табл. 1) показывает, что они попадают в соответствующие интервалы значений  $\delta$ . Но только для колец диаметром 18 мм  $\delta_{\min}$  находится вблизи нижней границы поля допусков, в то время как для колец диаметром 23 и 29,6 мм они приближаются к верхней границе допустимого интервала. Это указывает на то, что для материала таких колец необходимо несколько повысить значения модуля упругости. С точки зрения эксплуатационных характеристик основным показателем является сила  $Q$ , обеспечивающая заданную величину сил трения покоя по наружной поверхности кольца, что предотвращает его проворачивание при вращении ротора. В то же время величина  $\delta$  может служить для оперативного контроля характеристик упругости колец, однако измерять ее с целью исключения побочных эффектов надо после сжатия колец до минимального зазора в замке и выдержки в этом состоянии в течение 10–20 с.

Оценим напряжения, возникающие в кольце при его сжатии до минимального зазора в замке. Такие условия создаются на заключительных операциях в процессе изготовления колец, а также при установке их в калибр для контроля прилегания и при сборке турбокомпрессоров. Для оценки величины напряжений воспользуемся выражением, приведенным в [3] для случая расчета изгиба бруса большой кривизны. Так как радиус колец отличается от высоты сечения несколько меньше, чем на порядок, это обеспечит более высокую точность анализа по сравнению с использованием модели прямого бруса:

$$\sigma = \frac{M_{\text{изг}}}{Fe} \frac{y}{r_0 + y} \pm \frac{N}{F}, \quad (8)$$

где  $M_{\text{изг}}$  — изгибающий момент Н·м;  $F$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $e = r - r_0$  — смещение нейтрального слоя в результате деформации, м;  $y$  — ордината точки сечения относительно нейтрального слоя, м;  $N$  — продольная сила, Н;  $r_0$  — радиус кривизны нейтрального слоя (в деформированном состоянии). Величину  $r_0$  находим из выражения:

$$r_0 = \frac{h}{\ln\left(\frac{r + h/2}{r - h/2}\right)}, \quad (9)$$

где  $h$  — высота сечения кольца м.

Максимальный изгибающий момент  $M_{\text{изг}} = Qr$  наблюдается в сечении, лежащем напротив замка кольца. В этом же сечении продольная сила  $N$  тоже будет иметь наибольшее значение, равное  $Q$ . Ее действие увеличивает сжимающие напряжения во внутренних слоях и уменьшает растягивающие напряжения в наружных слоях кольца. Однако в силу того что абсолютная величина диаметральной силы сжатия колец относительно невелика, эти изменения будут незначительны. Поскольку для чугуна более опасными являются растягивающие напряжения, расчет будем вести по ним. Подставляя в (8) значения для  $M_{\text{изг}}$  и  $N$ , получаем уравнение для оценки величины растягивающих напряжений в зависимости от силы  $Q$ :

$$\sigma_p = \frac{Q}{F} \left( r \frac{y}{e(r_0 + y)} - 1 \right). \quad (10)$$

Анализ экспериментальных данных с помощью уравнения (10) показал, что возникающие при сжатии колец диаметром 13 мм напряжения находятся в интервале 500–700 МПа, колец диаметром 18 мм — в пределах 550–650 МПа, а для колец диаметром 23 и 29,6 мм — в интервале 500–600 МПа.

Так как чугун с шаровидным графитом обладает достаточной пластичностью, то в случае превышения возникающими напряжениями предела текучести ( $\sigma_T$ ) в нем начинается пластическая деформация, ведущая к снижению напряжений до уровня  $\sigma_T$ . Поэтому полученные значения  $\sigma_p$  можно считать оценкой величины предела текучести материала колец соответствующего номинала. В то же время сила упругости кольца не может быть больше усилия, вызывающего в материале напряжения, равные  $\sigma_T$ . Максимальное значение диаметральной силы сжатия, которое можно достичь в кольце, найдем из выражения (10) при условии  $\sigma_p = \sigma_T$ :

$$Q_{\max} = \frac{\sigma_T F}{r \frac{y}{e(r_0 + y)} - 1}. \quad (11)$$

Из (11) с учетом (6) можно определить величину зазора в замке кольца, соответствующую  $Q_{\max}$ :

Таблица 2.

Номинальный диаметр кольца, мм	Диаметральная сила сжатия* $Q$ , Н		Зазор в замке кольца в свободном состоянии $\delta$ , мм	
	среднее значение	стандартное отклонение	среднее значение	стандартное отклонение
13	17,8	2,37	2,2	0,17
	15,6	2,34	1,6	0,46
18	25,0	1,33	2,5	0,28
	24,8	0,71	2,0	0,12
23	21,9	1,53	2,8	0,19
	22,0	0,53	2,7	0,13
29,6	27,9	1,05	3,7	0,31
	26,1	0,13	3,6	0,31

\* В числителе — экспериментальные, в знаменателе — расчетные значения.

Таблица 3.

Номинальный диаметр кольца, мм	Размер предварительно обработанных заготовок колец				Минимальный зазор после термофиксации, мм
	наружный диаметр, мм	внутренний диаметр, мм	ширина сечения, мм	высота сечения, мм	
13	13,3	11	1,6	1,1	1,3
18	18,3	15,3	1,6	1,5	1,5
23	23,3	20,2	1,8	1,55	2,2
29,6	29,9	26,2	1,8	1,85	3,1

$$\delta_{\max} = \frac{\sigma_{\tau} F}{K \left( r \frac{y}{e(r_0 + y)} - 1 \right)}, \quad (12)$$

где  $K = \frac{EJ}{2r^3(1 + \pi/4)}$ .

Из (11) и (12) видно, что значения  $Q_{\max}$  и  $\delta_{\max}$  зависят как от свойств материала, так и от геометрических характеристик колец. Полагая  $E$  и  $\sigma_{\tau}$  равными их средним экспериментальным значениям, оценим вклад, который вносит варьирование размеров колец в пределах их поля допусков в разброс значений  $Q$  и  $\delta$ . Результаты моделирования на ЭВМ представлены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показывает достаточно высокую степень совпадения расчетных и экспериментальных значений для  $Q_{\text{ср}}$ . Наблюдаемые отклонения превышают 10 % только для колец диаметром 13 мм и объясняются скорее всего тем, что принятые в расчете значения  $\sigma_{\tau}$  несколько ниже реальных, достигаемых в кольцах диаметром 13 и 29,6 мм. Из табл. 2 видно, что стандартные отклонения экспериментальных значений  $Q$  в целом уменьшаются с ростом диаметра колец. Это свидетельствует о соответствующем повышении стабильности их упругих свойств. Вклад варьирования геометрических размеров почти полностью определяет разброс значений  $Q$  для колец диаметром 13 мм, но затем убывает с ростом диаметра колец быстрее, чем экспериментальные значения стандартного отклонения. Это наглядно подтверждает тот факт, что фактор точности размеров становится определяющим в достижении высокой стабильности упругих характеристик колец малого диаметра. В частности, необходимо стремиться к уменьшению ширины поля допусков на высоту сечения кольца диаметром 13 мм с  $\pm 0,06$  мм (см. табл. 1) до хотя бы  $\pm 0,04$  мм.

Случайные колебания размеров колец в пределах поля допусков почти полностью определяют наблюдаемые на практике отклонения величины зазора в замке, причем более полно для колец диаметром 23 и 29,6 мм. Используя выражение (12), оценим минимальные значения  $\delta$  из условия равенства напряжений, возникающих при сжатии термофиксированных колец пределу текучести. В табл. 3 приведены геометрические размеры предварительно обработанных заготовок колец перед выполнением операции термофиксации и соответствующие расчетные значения  $\delta_{\text{тф min}}$ .

Сравнение полученных значений  $\delta_{\text{тф min}}$  с величинами для  $\delta_{\max}$  из табл. 2 показывает, что так как в результате обработки резанием происходит уменьшение высоты сечения, должно происходить увеличение зазора в замке колец после их извлечения из оправки. Это явление имеет место на практике для колец всех размеров.

Проведенный анализ показывает, что упругие характеристики колец из ЧШГ в конечном счете определяются уровнем предела текучести материала, из которого они изготовлены. Причем достижение напряжениями при сжатии кольца уровня  $\delta_{\tau}$  в рассматриваемой технологии их изготовления является необходимым условием обеспечения высоких и стабильных значений диаметральной силы  $Q$  и задается величиной зазора в замке при термофиксации.

### Литература

1. Бодяко А. М., Галагаев С. В. Проектирование кольцевой оснастки и литье из ЧШГ заготовок для уплотнительных колец турбокомпрессоров // Литье и металлургия. 1999. № 4. С. 26—27.
2. Бодяко А. М., Галагаев С. В., Лобач Н. И. Заготовки из ЧШГ для уплотнительных колец турбокомпрессоров // Литейное производство. 1999. № 9. С. 20—22.
3. Бодяко А. М., Бевза В. Ф., Галагаев С. В., Мазько В. С. Непрерывно-циклическое литье намораживанием: от идеи к практическому применению // Литье и металлургия. 2001. № 2. С. 34—40.