

УДК 621.77.016.3
DOI: 10.12737/24208

А.В. Королев, д.т.н., **А.Ф. Балаев**, к.т.н.,
А.С. Яковишин, аспирант
(Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: bandrey.sc@gmail.com

Технология снятия остаточных напряжений при многоциклового обкатке колец подшипников

Описан технологический способ снятия остаточных напряжений наружных колец подшипников путем их многоциклового обкатки между тремя валками. Разработана математическая модель для расчета оптимального времени бесцентровой многоциклового обкатки колец. Представлена в графическом виде зависимость остаточных напряжений колец от продолжительности обкатки при различных факторах.

Ключевые слова: остаточные напряжения; многоциклового обкатка; кольцо подшипника; релаксация напряжений.

A.V. Korolyov, D. Eng., **A.F. Balayev**, Can. Eng.,
A.S. Yakovishin, Post graduate student
(Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Polytechnicheskaya Str, 410054, Saratov)

Technology of residual stresses removal at multi-cycle racers running-in

The substantiation of the new technology of multi-cycle racer running-in is shown. A technological method for racer residual stresses removal by means of multi-cycle centerless running-in is described. For the computation of running-in basic time which is necessary for the complete removal of residual stresses there is developed a simulator. A simulator takes into account geometrical and mechanical conditions of the contact of rollers and a racer, physical-mechanical and geometrical parameters of a racer. On the basis of the simulator obtained there is carried out an investigation of the dependence of residual stress upon the duration of racer multi-cycle running-in for various stressed states. It is established that for the efficient stress removal the running-in time must be optimum. If time is lesser than optimum, then there is no a complete removal of residual stresses.

At processing time longer of optimum one after a complete removal of residual stresses the accumulation of new residual stresses takes place.

Keywords: residual stresses; multi-cycle running-in; racer; stress relaxation.

Подшипники качения находят широкое применение в различных механизмах от надежности которых зависит безотказность и надежность машин в целом. Для обеспечения требуемых показателей надежности к точности геометрических параметров колец подшипников предъявляются повышенные требования.

Поскольку, в силу геометрических особенностей, кольца подшипников имеют пониженную жесткость, то обеспечение требуемых высоких показателей качества при их изготов-

лении представляет особую сложность. Это обусловлено чувствительностью геометрической формы и точности колец к остаточным напряжениям, накопление которых происходит в процессе механической и термической обработки на протяжении всего цикла производства [1].

Вследствие этого наличие даже небольших остаточных напряжений приводит к существенному снижению геометрической точности колец, и как следствие к изменению условий эксплуатации и сокращению срока службы.

Для решения этой проблемы, перед окончательной механической обработкой, кольца подшипников подвергают технологической операции стабилизации, которая традиционно производится термическим методом.

Недостатками термической стабилизации геометрических параметров колец является высокое энергопотребление, низкая производительность и неполное снятие остаточных напряжений [2]. Часть внутренних напряжений остается в металле и может сказываться на работоспособности подшипников. Сразу после обработки или спустя некоторое время после изготовления подшипников происходит релаксация внутренних напряжений, сопровождаемая деформацией колец. Наиболее интенсивно релаксация остаточных напряжений протекает под действием циклических нагрузок [3, 4], в том числе в процессе эксплуатации изделий.

Данное явление послужило основанием для разработки нового технологического способа стабилизации геометрических параметров колец на основе многоциклового нагружения осуществляемого при обкатке.

Технологический способ многоциклового обкатки колец

В устройстве для релаксации остаточных напряжений кольцевых деталей (рис. 1) базирование кольца 4 осуществляется по цилиндрическим поверхностям валков 2 и 3. После установки кольца 4 радиальная нагрузка P , создаваемая третьим валком 1, прикладывается к кольцу в месте, равноудаленном от мест контакта кольца с базирующими валками. Таким образом, осуществляется силовое замыкание контакта. Прикладываемая нагрузка P не меняется на протяжении всего цикла обработки, состоящего из множества циклов обкатки детали. Один из базирующих валков сообщает вращательное движение n кольцу 4, в результате чего происходит равномерное упругое деформирование материала вдоль всей окружности кольца на величину технологической деформации Δ .

Реализация данного способа направлена на сокращение времени снятия остаточных напряжений и сохранение стабильности геометрической формы изделий при их эксплуатации. Однако при продолжительной многоциклового нагрузке процесс релаксации остаточных напряжений сменяется обратным процессом, т.е. накоплением энергии внутренних напряжений, приводящим к разрушению изделия. Поэтому важным вопросом при разработ-

ке технологии многоциклового обкатки является определение продолжительности обработки, при которой произойдет полное снятие внутренних напряжений.

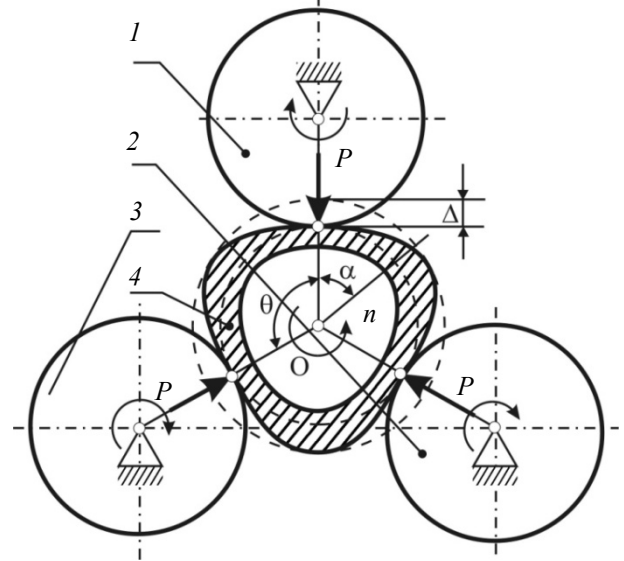


Рис. 1. Расчетная схема многоциклового обкатки кольцевых деталей:

1 – прижимающий валок; 2, 3 – базирующие валки; 4 – обкатываемое кольцо

Модель расчета времени многоциклового обкатки колец

Режим многоциклового обкатки колец выбирают из условия, чтобы энергия деформации детали e_o за время обработки равнялась потенциальной энергии деформации заготовки e_p , при которой осуществляется исправление ее погрешности:

$$e_o = K_p e_p, \quad (1)$$

где K_p – коэффициент потерь энергии многоциклового обкатки в результате нагрева заготовки, потери при сообщении энергии заготовке и прочих факторов.

При образовании остаточных напряжений на деталь действует нагрузка P . Под действием этой нагрузки в детали возникают внутренние напряжения (рис. 2).

Если напряжения превышают предел пластичности, то в соответствии с методикой И.А. Биргера [5], в кольцевой детали после снятия нагрузки возникнут остаточные напряжения, определяемые выражением:

$$\sigma_o(\theta) = \frac{1}{2} \frac{PDn}{W} \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \right) - \sigma_t, \quad (2)$$

где W – момент сопротивления изгибу;

θ – центральный угол сечения; σ_t – предел текучести материала заготовки; D_n – наружный диаметр кольца; α – угловой шаг точек приложения внешней нагрузки P ($\alpha = 2\pi/c_p$).

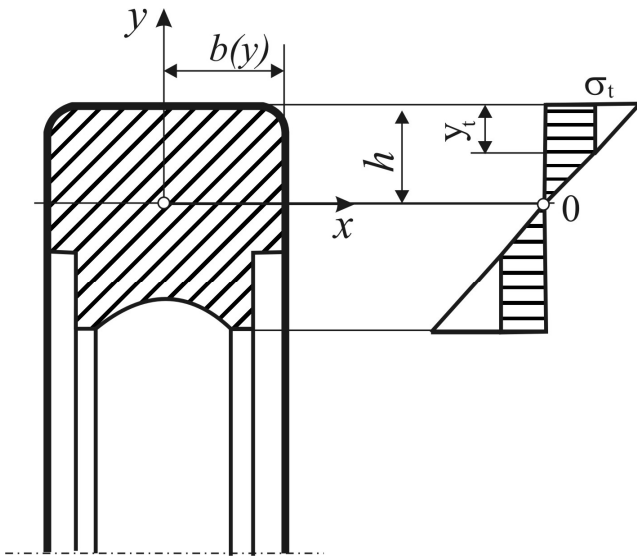


Рис. 2. Распределения внутренних напряжений в продольном сечении кольца:

h – расстояние от центральной оси сечения до крайней точки сечения; σ_t – напряжение в сечении на расстоянии y_t от крайней точки сечения; y_t – координата от крайней точки сечения; $b(y)$ – ширина сечения на расстоянии y от центральной оси; α – угловой шаг точек приложения внешней нагрузки P ; θ – центральный угол сечения

Так как максимальные значения напряжений возникают при $\theta = 0$, то

$$\sigma_o(\theta) = \sigma_{mo} \frac{\left(2 \sin \frac{\alpha}{2} - \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right)\right) - \sigma_t}{\left(2 \sin \frac{\alpha}{2} - \cos \left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) - \sigma_t}. \quad (3)$$

где σ_{mo} – максимальное напряжение, возникающее в материале кольцевой детали в процессе обработки:

$$\sigma_{mo} = \frac{1}{2} \frac{P_o D_n}{W} \left(\frac{c_o}{2\pi} - \frac{\cos \left(\frac{\pi}{c_o}\right)}{2 \sin \frac{\pi}{c_o}} \right), \quad (4)$$

где P_o – сила воздействия на деталь в процессе многоциклового обкатки; c_o – число валков, между которыми обкатывается деталь.

Без учета поперечных сил, которые оказы-

вают весьма незначительное влияние на напряженное состояние кольца, энергия возникновения остаточных напряжений определяется выражением:

$$e_p(\theta) = c_p \cdot \frac{\sigma_m^2 \cdot W^2}{E \cdot J} \times \left(\frac{\theta_p}{\frac{\alpha}{2}} \int J_M(\theta)^2 d\theta + \frac{4k_\sigma^2 \cdot h^6}{W^2} \int_{\theta_p}^0 J_P(\theta)^2 d\theta \right), \quad (5)$$

где σ_m – максимальное напряжение упругой деформации детали, определяемое без учета пластической деформации; θ_p – угол, при котором осуществляется переход от упругой зоны деформации к пластической; c_p – число точек приложения нагрузки P ; $k_\sigma = \sigma_t/\sigma_m$ – безразмерный коэффициент; $J_M(\theta)$ и $J_P(\theta)$ – принятые обозначения, равные соответственно (6) и (7):

$$J_M(\theta) = k_\sigma \frac{\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos \left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}}{\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos \left(\frac{\alpha}{2} - \theta_p\right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}}, \quad (6)$$

$$J_P(\theta) = k_\sigma^3 \frac{\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos \left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \right)^3}{\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos \left(\frac{\alpha}{2} + \theta\right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \right)} \times \left(\int_0^1 u^2 b\left(\frac{u}{y_t}\right) du + \int_1^{h/y_t} u b\left(\frac{u}{y_t}\right) du \right). \quad (7)$$

где $u = y/y_t$ – безразмерная величина.

Величину c_p следует принимать в зависимости от погрешности геометрической формы кольца перед обработкой. Если кольцо преимущественно имеет овал, то $c_p = 2$. Если погрешностью обработки является трехгранность, то $c_p = 3$.

В случае, если внешняя нагрузка при обкатке не вызывает пластическую деформацию, то энергия многоциклового обкатки опреде-

лится аналогично выражению (5):

$$e_o(\theta) = c_o \cdot \frac{\sigma_{mo}^2 \cdot W^2 \cdot n \cdot \tau}{E \cdot J} \int_0^{\frac{\alpha}{2}} J_M(\theta)^2 d\theta, \quad (8)$$

где n – частота вращения детали; τ – продолжительность обработки.

Приравнявая, согласно выражению (1), энергию деформации кольца (5) и энергию обкатки (8), найдем необходимое время обработки:

$$\tau = \frac{c_p}{c_o} \times \frac{\sigma_m^2 \cdot K_p \cdot \int_0^{\frac{\alpha}{2}} J_M(\theta)^2 d\theta + \frac{4k_\sigma^2 \cdot h^6}{W^2} \int_0^{\theta_p} J_p(\theta)^2 d\theta}{\sigma_{mo}^2 \cdot n \int_0^{\frac{\alpha}{2}} J_M(\theta)^2 d\theta} \cdot (9)$$

Из полученного выражения (9) видно, что требуемое время на стабилизацию геометрических параметров деталей зависит от множества факторов. К их числу относятся геометрическая форма заготовки, ее материал, физико-механические свойства материала, остаточные напряжения заготовки, напряжения, создаваемые в процессе многоциклового обкатки колец, требования, предъявляемые к заготовке после многоциклового обкатки колец.

Исследование технологического способа многоциклового обкатки колец

Для наглядной демонстрации зависимости остаточного напряжения от времени обработки было проведено компьютерное моделирование на примере наружного кольца прямоугольного сечения с наружным диаметром $D_n = 35$ мм, внутренним диаметром 30,5 мм, шириной $B = 11,6$ мм ($F = 25,85$ мм²; $W = 9,59$ мм³; $J = 10,67$ мм⁴), изготовленного из стали 30ХС ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $G = 8,5 \cdot 10^4$ МПа; $\sigma_t = 735$ МПа; $\sigma_s = 930$ МПа). До обработки деталь имела остаточные напряжения $\sigma_o = 67$ МПа, определяемые как разность между наибольшим и наименьшим их значениями. Многоцикловая обкатка кольца осуществлялась с частотой вращения $n = 60$ мин⁻¹.

Результаты моделирования представлены на графике (рис. 3), где показана зависимость образовавшихся остаточных напряжений в детали $\sigma_{mo}(k_\sigma, \tau)$ от времени обработки τ . Так как вдоль оси детали остаточные напряжения различны, как по величине, так и по направлению, то на графике (рис. 3) представлены напряжения как модуль разности между мак-

симальными противоположными по знаку остаточными напряжениями.

На рис. 3 видно, что с возрастанием k_σ , а, следовательно, уменьшением максимального напряжения упругой деформации σ_m в процессе стабилизации, требуемое время обработки уменьшается. Остаточные напряжения при обработке сначала уменьшаются до нуля, а потом возрастают.

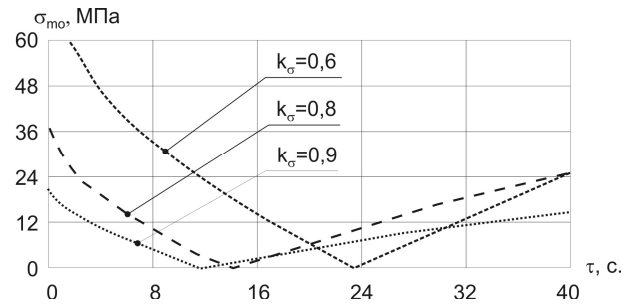


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений в детали $\sigma_{mo}(k_\sigma, \tau)$ от времени обработки τ при различных соотношениях величины $k_\sigma = \sigma_t / \sigma_m$, характеризующей наличием остаточных напряжений в заготовке

Уменьшение остаточных напряжений связано с тем, что в процессе многоциклового стабилизирующей обкатки кольца энергия, создаваемая при обработке, поглощает постепенно потенциальную энергию образования остаточных напряжений в детали. Но как только потенциальная энергия материала детали становится равной нулю, то дальнейшая стабилизирующая обработка вызывает увеличение потенциальной энергии материала детали и образование внутренних напряжений.

Заключение

Получена математическая модель для расчета времени многоциклового обкатки колец, необходимого для полного снятия остаточных напряжений. На основе математической модели установлено, что требуемое время обработки находится в прямой зависимости от частоты циклического нагружения, величины нагрузки, порядка гармоники преобладающей погрешности формы, числа контактных точек заготовки с валками.

Разработанная на основе данной модели технология стабилизации на основе многоциклового обкатки колец призвана заменить энергоемкую и низкопроизводительную операцию температурного отпуска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подзей, А.В., Сумма, А.Н., Евстигнеев, М.И. Технологические остаточные напряжения / под ред. А.В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

2. Блантер, М.Е. Теория термической обработки. – М.: Металлургия, 1984. – 327 с.
3. Рагульскис, К.М., Ступинас, Б.Б., Толутис, К.Б. Вибрационное старение. – Л.: Машиностроение, 1987. – 72 с.
4. Радченко, В.П., Саушкин, М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. – М.: Машиностроение, 2005. – 226 с.
5. Биргер, И.А., Шорр, Б.Д., Иосилевич, Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1993. – 640с.

REFERENCES

1. Podzey, A.V., Summa, A.N., Yevstigneyev, M.I. *Technological Residual Stresses* / under the editorship A.V. Podzey. – M.: Mechanical Engineering, 1973. – pp. 216.

2. Blanter, M.E. *Theory of Heat Treatment*. – M.: Metallurgy, 1984. – pp. 327.
3. Ragulskys, K.M., Stulpinas, B.B., Tolutis, K.B. *Vibration Ageing*. – L.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 72.
4. Radchenko, V.P., Saushkin, M.N. *Creep and Relaxation of Residual Stresses in Reinforced Structures*. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 226.
5. Birger, I.A., Shorr, B.D., Iosilevich, G.B. *Machine Parts Durability Computation: reference book*. – M.: Mechanical Engineering, 1993. – pp. 640.

Рецензент д.т.н. А.Н. Васин

Информация

по МНТК «Инновационные технологии в машиностроении: от проектирования к производству конкурентоспособной продукции (ТМ-2017)»

18 – 22 сентября 2017 г.
в г. Волгограде

при поддержке
Министерства образования и науки РФ
Ассоциации технологов-машиностроителей
Международного союза машиностроителей
Российской академии наук
Волгоградского государственного технического университета

состоится

IX Международная научно-техническая конференция
«Инновационные технологии в машиностроении:
от проектирования к производству конкурентоспособной продукции (ТМ-2017)»

Основная цель конференции – представление и обсуждение новейших результатов научных исследований и практических достижений в области проектирования изделий машиностроения; разработки современных высокоэффективных технологий обработки и сборки машин; развитие связей между научными школами в области машиностроения.

Тематические секции конференции:

1. Инновационное проектирование изделий машиностроения.
2. Научные инновационные технологии сварочного производства.
3. Научные инновационные технологии производства современных материалов и обработки без удаления поверхностного слоя.
4. Научные инновационные технологии механической обработки деталей машин.
5. Научные инновационные технологии электро-физико-химических и комбинированных методов обработки.
6. Научные инновационные технологии абразивной обработки и производства абразивного инструмента.
7. Научные инновационные автоматизированные технологии контроля и сборки машин.
8. Управление качеством изделий машиностроения.

Рабочие языки конференции – русский и английский.

Сроки предоставления и **правила** оформления материалов, **финансовые условия** участия и порядок платежей для участников будут опубликованы на сайте Волгоградского государственного технического университета <http://www.vstu.ru>.

Адреса для контактов:

учёный секретарь конференции
докт. техн. наук
Чигиринский Юлий Львович

E-mail: Julio-Tchigirinsky@yandex.ru

организационный комитет ВолГТУ
Волгоградский государственный технический университет
кафедра «Технология машиностроения»

Россия, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28
E-mail: techmash@vstu.ru; тема: «ТМ-2017»
тел.: +7-844-224-84-38