

С. Г. САНДОМИРСКИЙ¹, *д-р техн. наук, доц.*

В. В. ЯВОРСКИЙ²,

В. Е. АНТОНЮК³, *д-р техн. наук, проф.*

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

²ОАО «БЕЛАЗ - управляющая компания холдинга БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»
(Жодино, Беларусь)

³Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ОЦЕНКЕ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ КОЛЬЦЕРАСКАТКОЙ

Аннотация

Описаны преимущества производства изделий кольцераскаткой и проблемы кольцераскатки: погрешности формы, деформации и внутренние напряжения, возникающие в процессе изготовления маложестких колец. Проанализированы пути повышения геометрической точности колец и снятия остаточных напряжений. В качестве принципиально новой технологической операции, повышающей точность изготовления маложестких колец и снижающей остаточные напряжения в них, предложена технология динамической стабилизации – циклическое нагружение. Объяснено принципиальное преимущество метода динамической стабилизации перед другими видами правки. Обоснована перспективность использования циклического нагружения для повышения геометрической точности и снижения остаточных напряжений в маложестких кольцах. Исследованы возможности и предложена методика неразрушающего определения остаточных напряжений в кольцевом изделии, использующая результаты измерения распределения магнитного параметра материала кольца вдоль его поверхности.

Ключевые слова: кольцо, кольцераскатка, остаточные напряжения, циклическое нагружение, динамическая стабилизация, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность.

Кольцераскатку широко используют в машиностроении [1]. В технологии кольцераскатки используют положения пластического деформирования материалов [2 – 5]. Кроме изготовления деталей сложной формы, пластическое деформирование позволяет создавать ответственные детали машиностроения с высокими механическими свойствами. Применение компьютерной техники и исследования кольцераскатки послужили созданию автоматизированных кольцераскатных комплексов [6], одной из задач которых является производство маложестких кольцевых заготовок [7].

Согласно предложенной классификации маложесткими считают кольца с отношением d/D внутреннего диаметра d к наружному диаметру D от 0,84 до 0,90 и отношением h/D высоты h кольца к D в от 0,03 до 0,12 [8]. Производство маложестких деталей является приоритетным и актуальным направлением для машиностроения. За счет отсутствия швов оно гарантирует высокие механические свойства ответственных изделий кольцевой формы и снижает их материалоемкость. Основной технологией изготовления маложестких колец является кольцераскатка в горячем состоянии (рис. 1).

При кольцераскатке возникает погрешность в виде овальности маложестких колец. При охлаждении происходит их температурная усадка и коробление. Технология охлаждения и правки кольца при поставке кольцераскатных комплексов не предусмотрена и разрабатывается изготовителем для конкретных колец. Поэтому окончательная точность колец зависит от ряда факторов и может различаться при изготовлении одних и тех же колец для разных производств. Кроме того, при охлаждении и термической обработке деталей возникают остаточные напряжения, изменяющие их геометрические размеры и форму при изготовлении и последующей эксплуатации. Эта проблема часто проявляется у маложестких колец.



Рис. 1. Процесс кольцераскатки маложесткого кольца

Для стабилизации формы и обеспечения стабильности размеров таких изделий в процессе эксплуатации используют правку деформированием статической нагрузкой [9] при помощи экспандеров, имеющих кинематическую схему, основанную на применении клинового механизма. Но такой способ стабилизации формы изделия и обеспечения стабильности размеров не эффективен. Причина этого в том, что деформировании статической нагрузкой остаточные напряжения не удаляет. Через некоторое время изделие приобретает прежнюю форму. Общее решение задачи стабилизации геометрических параметров и одновременного снижения остаточных напряжений в процессе изготовления таких деталей отсутствует. Поиски эффективных технологических методов ее решения продолжаются.

Цель доклада – обсуждение использования разработанной в ОИМ НАН Беларуси методики динамической стабилизации и реализующей ее экспериментальной установки с рычажно-шарнирным механизмом при планируемом производстве маложестких кольцевых заготовок на Белорусском автомобильном заводе. Анализ путей определения напряженного состояния

заготовок после кольцераскатки и динамической стабилизации по результату измерения распределения вдоль заготовки магнитного параметра ее материала.

Динамическая стабилизация основана на том, что при нагружении изделия знакопеременной циклической нагрузкой с амплитудными значениями в диапазоне от предела пропорциональности до предела текучести происходит стабилизация геометрической формы изделия относительно оси или плоскости приложения знакопеременной нагрузки [10, 11]. Процесс динамической стабилизации происходит в относительно узком диапазоне высоких напряжений, но не выше предела текучести ζ_T , и в относительно узком диапазоне суммарного числа циклов нагружения с учетом свойств упрочняющихся и разупрочняющихся материалов. Для реализации динамической стабилизации необходимо создание напряженного состояния в возможно большем объеме детали.

По [12] циклическое силовое воздействие на изделие 1 кольцевой формы силой разжима P осуществляют в радиальном направлении по внутреннему периметру изделия в противоположных от оси изделия 1 направлениях (рис. 2).

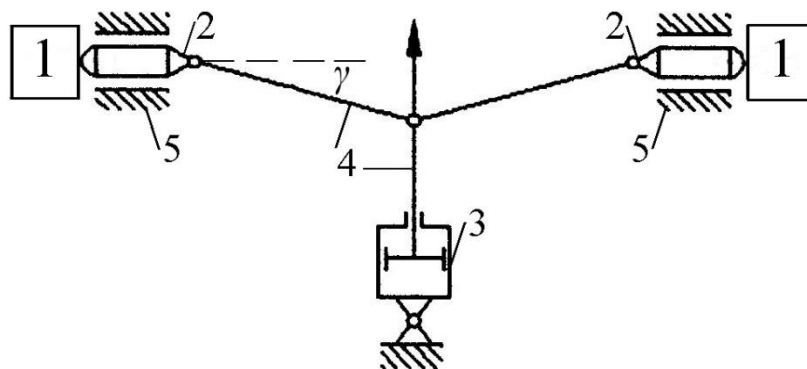


Рис. 2. Схема нагружения в маложесткого кольца 1 плунжерами 2 в устройстве по патенту [12]. 3 – гидропривод, 4 – рычажно-шарнирный механизм, 5 – корпус, γ – угол наклона рычага

В установке использована 6-ти позиционная схема нагружения (рис. 3а) кольца радиальными растягивающими силами одинаковой величины P , лежащими в одной плоскости с равномерным шагом по окружности (рис. 3б). При этом однополярная сила разжима P , благодаря кольцевой форме изделия 1, создает в его материале растягивающие усилия противоположного направления (рис. 3), что обеспечивает устойчивое положение изделия 1 в процессе стабилизации его размеров. Силовое воздействие на изделие 1, в соответствии с [12], обеспечивает создание в материале изделия 1 напряжений нужной величиной ζ_m для всех сталей. Циклограмма динамической стабилизации должна состоять из участков A , B и C (рис. 4). На участке A происходит рост нагрузки до начала возникновения в материале кольца напряжений на уровне от 0,9 до 0,95 предела текучести ζ_T материала кольца при температуре стабилизации и возникновения петли механического гистерезиса. На участке B ширина этой петли стабилизируется, а на участке C петля закрывается. На всех

трех участках нагрузка должно быть циклическим с достижением расчетного суммарного уровня нагружения.

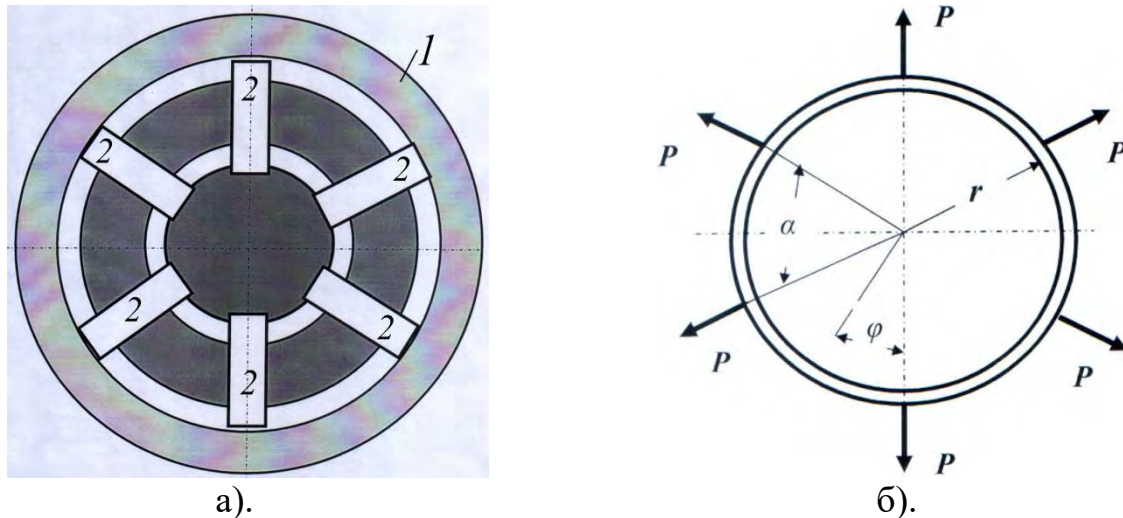


Рис. 3. Схемы нагружения кольцевой заготовки 6-ю равномерно распределенными радиальными усилиями: а – схема расположения стабилизируемого изделия и плунжеров, б – схема нагружения кольца радиальными силами

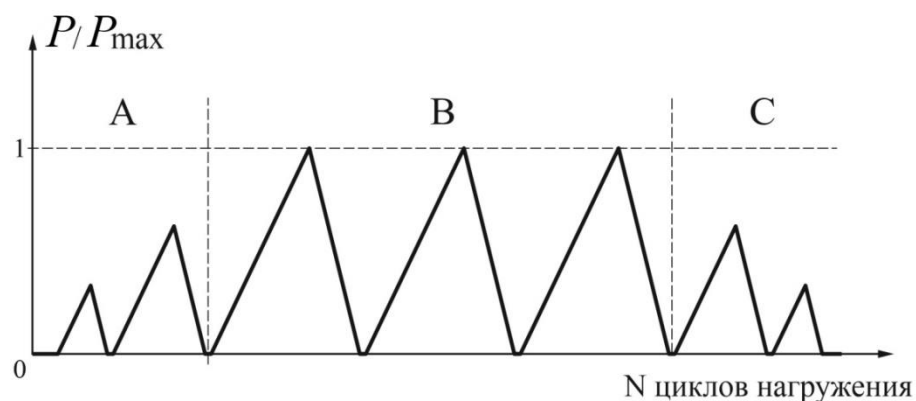


Рис. 4. Схема циклограммы динамической стабилизации маложестких колец по [12]

Количество вращательных перемещений сил P разжима относительно внутренней поверхности кольца устанавливают из расчета воздействия на материал кольца до 200 циклов нагружения при количестве циклов с максимальным нагружением (участок В на рис. 4), обеспечивающих создание в материале кольца 1 напряжений величиной ζ_m и расположенных в циклограмме нагружения симметрично относительно ее центра, – до 60 [13].

В основе неразрушающего контроля напряженного состояния ферромагнитных материалов лежит зависимость его магнитных параметров (прежде всего – коэрцитивной силы H_c) от величины приложенных и остаточных напряжений [14 – 20]. Поэтому для реализации метода неразрушающего определения остаточных напряжений в кольцевых заготовках нами предложено измерять распределение магнитного параметра

(коэрцитивной силы или связанной с ней остаточной намагниченности изделия после полюсного намагничивания его поверхности) вдоль кольца (рис. 5).

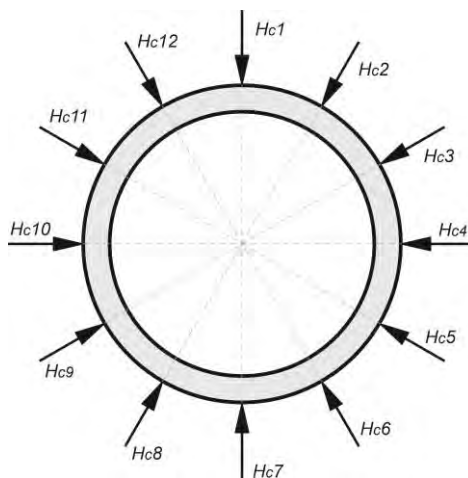


Рис. 5. Схема распределения позиций измерения магнитного параметра (коэрцитивной силы H_c) вдоль образующей кольцевого изделия

При этом распределение магнитных свойств материала кольца после кольцераскатки вдоль его образующей можно обосновано считать однородным. Тогда критерием наличия остаточных напряжений в кольце будет величина отношения разницы между максимальным и минимальным значениями (рис. 5) результатов ($H_{c1}, H_{c2}, \dots, H_{c12}$) измерения магнитного параметра вдоль образующей кольца к их среднему значению. Основанием для такого подхода определения остаточных напряжений в изделиях, полученных кольцераскаткой, служит так же успешные результаты его применения для определения остаточных напряжений в фрикционных дисках после их динамической стабилизации [21, 22].

Список литературы

1. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в производстве деталей машиностроения / В. Е. Антонюк [и др.] – Мн. : Беларуская навука, 2013. – 188 с.
2. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 424 с.
3. Ковка и штамповка. Справочник. - Т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1986. – 692 с.
4. **Groche, P.** Inkrementelle Massivumformung / P. Groche, D. Fritsche // Werkstattstechnik. – 2005, № 10. – P.798-802.
5. **Doege, E.** Handbuch Umformtechnik / E. Doege, B.-A. Behrens. – Springer Verlag, 2007. – 913 p.
6. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в условиях автоматизированного производства / В. Е. Антонюк, П. А. Пархомчик, В. В. Рудый – Мн. : Беларуская навука, 2021. – 245 с.
7. **Антонюк, В. Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Рудый // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021, № 2 (55). – С.43-54.
8. **Антонюк, В. Е.** Разработка классификатора колец при использовании процесса кольцераскатки / В. Е. Антонюк, В. В. Яворский // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. – 2019, № 4. – С.42-45.

9. **Мошнин, Е. Н.** Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование / Е. Н. Мошнин. – М. : Машиностроение, 1967. – 272 с.
10. **Антонюк, В. Е.** Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В. Е. Антонюк. – Мн. : Беларуская навука, 2017. – 190 с.
11. **Антонюк, В. Е.** Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцераскатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020, № 3 (52). – С.28-35.
12. **Антонюк, В. Е.** Способ стабилизации формы и размеров маложесткого осесимметричного изделия: пат. на изобретение 23995 Респ. Беларусь, МПК B21D 3/08 / В. Е. Антонюк и др.; заявитель: Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси». № а20210227; заявл. 29.07.2021; опубл. 30.04.2023. // Афіцыйны бюл./ Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2023, № 2.
13. **Антонюк, В. Е.** Научные рекомендации по проектированию установки для правки маложестких колец / В. Е. Антонюк, В. В. Яворский, С. Г. Сандомирский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Вып. 12, 2023. – С.258-262.
14. **Кулеев, В. Г.** Исследование влияния существенных различий величин коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и начальной магнитной проницаемости ферромагнитных сталей в нагруженном и разгруженном состояниях при их пластическом растяжении / В. Г. Кулеев [и др.] // ФММ. – 2007. – Т.103, № 2. – С.136-146.
15. **Кулеев, В. Г.** Механизмы влияния внешних и внутренних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей / В. Г. Кулеев, Э. С. Горкунов // Дефектоскопия. – 1997, № 11. – С.3-18.
16. **Кулеев, В. Г.** Возможности использования зависимости остаточной намагниченности от упругих напряжений для неразрушающего контроля в стальных ферромагнитных конструкциях / В. Г. Кулеев, Г. В. Бида, Л. В. Атангулова // Дефектоскопия. – 2000б № 12. – С.3-20.
17. **Безлюдько, Г. Я.** Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций / Г. Я. Безлюдько, В. Ф. Мужичкий, Б. Е. Попов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1999б – Т. 65б № 9. – С.53-57.
18. **Корзунин, Г. С.** Контроль величины остаточных напряжений в электротехнической анизотропной стали / Г. С. Корзунин, М. Л. Лобанов, Л. В. Лобанова // Дефектоскопия. – 2016, № 12. – С.39-45.
19. **Филинов, В. В.** Контроль напряженного состояния трубопроводов по магнитным параметрам металла / В. В. Филинов, А. Н. Кузнецов, П. Г. Аракелов // Дефектоскопия. – 2017, № 1. – С.41-50.
20. **Горкунов, Э. С.** Сопоставление магнитных параметров закаленных трубных сталей с остаточными макро- и микронапряжениями, определенными рентгеновским методом / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, Л. С. Горулева // Дефектоскопия. – 2019, № 5. – С.22-30.
21. **Антонюк, В. Е.** Анализ влияния технологии изготовления фрикционных дисков на однородность из магнитных свойств / В. Е. Антонюк [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. Сб. науч. труд. Вып. 4, 2015. Минск, ОИМ НАН Беларуси. – С.363-364.
22. **Antoniuk, W.** Badanie mozliwosci estymacji naprezen szcztakowych na podstawie gradientu pola namagnesowania (Testing the possibility of estimation of residual stress based on gradient of magnetic field) / W. Antoniuk, S. Sandomirskij, J. Jaroshewicz // Materiały. Rok Wyd. LXXVI. Zeszyt 2/2017. – P.9-13.

Контакты:

sand_work@mail.ru (Сандомирский Сергей Григорьевич)

vladi@tut.by ([Антонюк Владимир Евгеньевич](#))

v.javorskij@belaz.minsk.by (Яворский Владимир Васильевич)