

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-1-40-48

УДК 621.822.1

**ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МАГНИТНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ
ЗАЦЕПЛЕНИЙ РЕДУКТОРОВ ЭКСКАВАТОРОВ**

**EXPERIENCE AND RESULTS OF USE MAGNETIC-LUMINESCENT CONTROL
METHOD EXCAVATOR REDUCER CLAIMS**

Дрыгин Михаил Юрьевич,
канд. техн. наук, e-mail: mike.drygin@gmail.com
Mikhail Yu. Drygin, C. Sc. In Engineering,
Курышкин Николай Петрович,
канд. техн. наук, доцент, e-mail: kemnik@mail.ru
Nikolai P. Kuryshkin, C. Sc. In Engineering, Associate Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennyaya, Kemerovo, 650000,
Russian Federation

Аннотация:

В статье обоснована необходимость и целесообразность использования магнитно-люминесцентного метода неразрушающего контроля деталей редукторов экскаваторов. Описаны особенности применения различных методов их намагничивания. С учетом минимизации трудоемкости контроля, экономии материалов и повышения информативности даны рекомендации по применимости различных методов намагничивания типовых деталей редукторов: мелко- и крупномодульных шестерен, зубчатых венцов, водил и валов. Установлено, что зубчатые колеса с наружным диаметром до 500 мм целесообразно намагничивать циркуляционным методом с помощью тороидальной обмотки, а колеса диаметром более 500 мм – продольным намагничиванием. Трудоемкость продольного намагничивания валов катушкой соленоида на 84% меньше трудоемкости намагничивания постоянным магнитом. Экспериментально подтверждено, что магнитно-люминесцентный метод контроля водил возможен только с использованием циркуляционного метода намагничивания. Выявлены характерные зоны наиболее вероятного появления трещин на валах и водилах. Учет этого фактора при проведении неразрушающего контроля позволит сократить трудоемкость всего контроля не менее чем на 60%. Приведен опыт расшифровки индикаторных следов магнитного порошка на деталях с характерными трещинами и их скоплениями.

Ключевые слова: Экскаватор, редуктор, зубчатое зацепление, дефект, неразрушающий контроль, трещины и их скопления, магнитно-люминесцентный метод.

Abstract:

The article substantiates the necessity and expediency of using the magnetic-luminescent method of non-destructive testing of parts of excavator gearboxes. The features of the application of various methods of their magnetization are described. Considering the minimization of the laboriousness of control, material saving and increasing information content, recommendations are given on the applicability of various methods of magnetization of typical gear components: small and large-modular gears, ring gears, carriers and shafts. It has been established that gear wheels with an outer diameter of up to 500 mm are advisable to magnetize by the circulating method using a toroidal winding, and wheels with a diameter of more than 500 mm by longitudinal magnetization. The laboriousness of longitudinal magnetization of shafts by a solenoid coil is 84% less than the laboriousness of permanent magnetization. It has been experimentally confirmed that the magnetic-luminescent method of controlling a carrier is possible only using the circulating method of magnetization. The characteristic zones of the most likely occurrence of cracks on the shafts and carriers have been revealed. Consideration of this

factor during non-destructive testing will reduce the complexity of the entire control by at least 60%. The experience of decoding indicator traces of magnetic powder on parts with characteristic cracks and their accumulations.

Key words: *Excavator, gearbox, gearing, defect, non-destructive testing, cracks and their accumulations, magnetic fluorescent method.*

Введение

Основными технологическими машинами, работающими на угольных разрезах, являются экскаваторы. Эффективность работы этих машин в значительной мере определяется надежностью и безотказностью работы редукторов [1-4]. Экстремальные условия работы этих агрегатов, характер преобразования вращательного движения посредством высших кинематических пар и их высокая стоимость обусловили приоритетное внимание к этим узлам при проведении планово-предупредительных ремонтов [5, 6]. Повышение эффективности и качества ремонта экскаваторов, основанное на применении системы планово-предупредительных ремонтов с широким использованием методов и средств неразрушающего контроля, позволяет добиться высоких результатов, выраженных в сокращении аварийных простоев и проведении качественных ремонтов [7].

Проведенный ранее на угольных разрезах Кузбасса и Красноярского края в течение семи лет масштабный производственный эксперимент позволил выявить наиболее информативные методы неразрушающего контроля зубчатых зацеплений редукторов. Установлено, что все дефекты зубчатых зацеплений редукторов, не выявляемые визуально-измерительным контролем, выявляются магнитно-люминесцентным методом контроля (МЛК) (до 32% от общего количества). Этот метод является самым информативным при выявлении такого опасного дефекта, как трещины и скопление трещин. Эти дефекты являются недопустимыми, так как развитие трещин неизбежно приводит к выкалыванию зубьев или к разрушению других элементов зубчатых зацеплений (зубчатых колес, зубчатых венцов, валов) [8].

МЛК является разновидностью магнитопорошкового метода неразрушающего контроля (МК). Он основан на притяжении магнитных частиц силами неоднородных магнитных полей, образующихся над дефектами в намагниченных объектах, с образованием в зонах дефектов индикаторных рисунков в виде скоплений магнитных частиц [9]. Нанесение флуоресцентной магнитной суспензии осуществляется распылением из баллона. Осмотр объекта контроля на предмет наличия дефектов проводится с помощью ультрафиолетового фонаря. Его направляют на осматриваемую поверхность не под прямым углом, а под наклоном. Магнитные частицы в свете ультрафиолетового

фонаря светятся зеленым цветом. В случае обнаружения неоднозначных индикаторных рисунков контролируемую поверхность просматривают под лупой.

Выявляемость дефектов – основной критерий качества контроля, и, как следствие, целесообразности его применения. На снижение выявляемости дефектов могут влиять:

- загрязненность поверхности нагаром, продуктами коррозии и смазками;
- шероховатость контролируемой поверхности более 10 мкм;
- наличие дефектов, расположенных с углом более 30° с контролируемой поверхностью или с направлением магнитного потока.

Последний фактор наиболее значим, так как незнание направления расположения дефектов обязывает либо проводить намагничивание как минимум в двух направлениях, либо проводить исследования и определять зоны и направления расположения дефектов.

Анализ и выбор видов намагничивания

Основным условием высокой производительности МК является решение задачи определения оптимального способа намагничивания, отвечающего следующим требованиям: технологичность и обеспечение выявляемости дефектов. Существуют следующие основные виды намагничивания: циркуляционное, продольное и комбинированное [10]. Контроль возможен как в приложенном, так и в остаточном магнитном поле. Намагничивание – одна из наиболее трудоемких составляющих МК. Это особенно касается деталей сложной формы: корпусных деталей, водил, валов, зубчатых венцов, крупно- и мелкомодульных шестерен. Время, затраченное на намагничивание детали и подготовительные операции, связанные с ним, составляет 30-35% времени работ непосредственного контроля при использовании намагничивания одним методом. Если же необходимо проводить контроль в два и более этапа намагничивания, то время контроля, соответственно, увеличивается в два и более раз.

Продольное намагничивание осуществляют постоянным магнитом, соленоидом или электромагнитом. В целом можно выделить следующие достоинства и недостатки видов намагничивания:

- работа с постоянным магнитом наиболее мобильна, но требует значительных физических затрат при демонтаже магнита с детали; зона контроля мала и требует частой перестановки

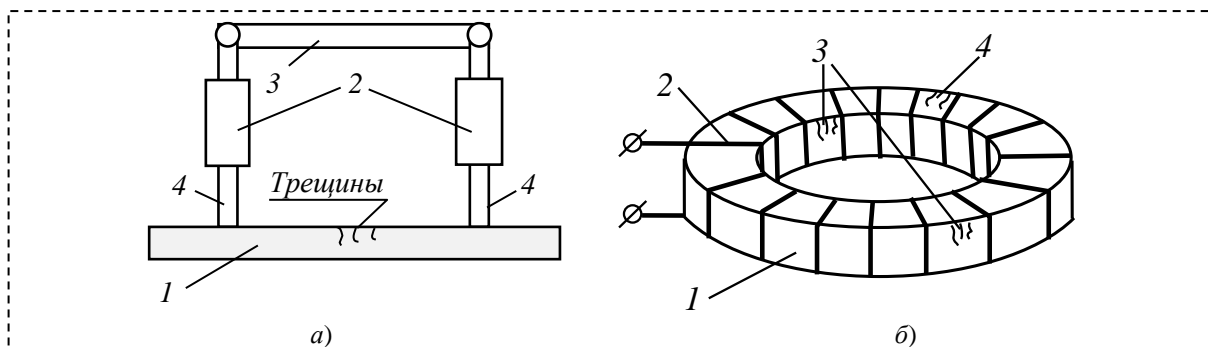


Рис. 1. Схема продольного а) и циркуляционного б) намагничивания
 Fig. 1. Scheme of longitudinal a) and circulation b) magnetization

Таблица 1. Характеристики тороидальной обмотки
 Table 1. Toroidal winding characteristics

№ детали	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>D</i> , см	100	130	130	130	150	150	150	150	270	290	480	400
<i>d</i> , см	40	40	40	40	60	60	60	60	70	50	400	50
<i>n</i>	8	10	10	10	13	13	13	13	20	20	53	27

магнита, что увеличивает время контроля;

- использование электромагнита лишено первого недостатка, но оставляет нерешенным второй;

- использование катушки соленоида удобно для контроля малогабаритных деталей и валов, а использование самой детали в качестве катушки ограничено формой детали.

Циркуляционное намагничивание может осуществляться тремя способами:

- пропусканием тока (500 А и более) по детали, однако в этом случае между электродом и деталью может возникать электрическая дуга, образуя прижоги, что недопустимо, так как в последствии может повлечь зарождение критических дефектов;

- с помощью провода с током, намотанного на деталь тороидальной формы; способ, наиболее подходящий для зубчатых колес;

- индуктированием тока в детали посредством крупногабаритных специализированных намагничивающих установок.

Производственный эксперимент

Трещины и их скопления являются основными дефектами деталей редуктора, выявляемые методом МЛК. Поэтому данный метод контроля направлен именно на определение зон и направлений расположения этих дефектов.

К дефектоскопии методом магнитопорошкового контроля допускаются специалисты, аттестованные на первый, второй, либо на третий уровень, а к разработке методики контроля – только специалисты третьего уровня [11]. Именно таким специалистом и был выполнен производственный эксперимент, описанный в данной статье.

Определение класса контроля – одна из приоритетных задач, определяющих достоверность контроля. ГОСТ 18442-80 предусматривает 5 классов чувствительности контроля в зависимости от ширины раскрытия выявляемых дефектов [12]. Поскольку первично было установлено, что значительное количество дефектов имеют раскрытие от 1 до 10 мкм, а некоторые (не более 15%) – менее 1 мкм, то контроль производился по первому классу с обеспечением требований ГОСТ Р 55612-2013, ГОСТ Р 56512-2015, ГОСТ Р ИСО 9934-1-2011 [13-17].

На основании анализа достоинств и недостатков различных методов намагничивания было решено проводить контроль в несколько этапов.

- Контроль с продольным намагничиванием при помощи постоянного магнита (электромагнита) для всех деталей.

- Контроль с продольным намагничиванием с использованием катушки соленоида для валов.

- Контроль с намагничиванием циркуляционным способом с помещением провода с током в отверстие деталей тороидальной формы.

При продольном намагничивании немагнитное поле в объекте контроля 1 (рис. 1, а) возбуждалось электромагнитами 2, магнитопроводом 3 и полюсными наконечниками 4 либо аналогично постоянным магнитом.

При циркуляционном намагничивании (рис. 1, б) магнитное поле в объекте контроля, имеющего тороидальную форму 1, возбуждалось обмоткой 2, подключенной к источнику тока. При таком способе выявлялись трещины как на цилиндрической 3, так и на торцевой 4 поверхности.

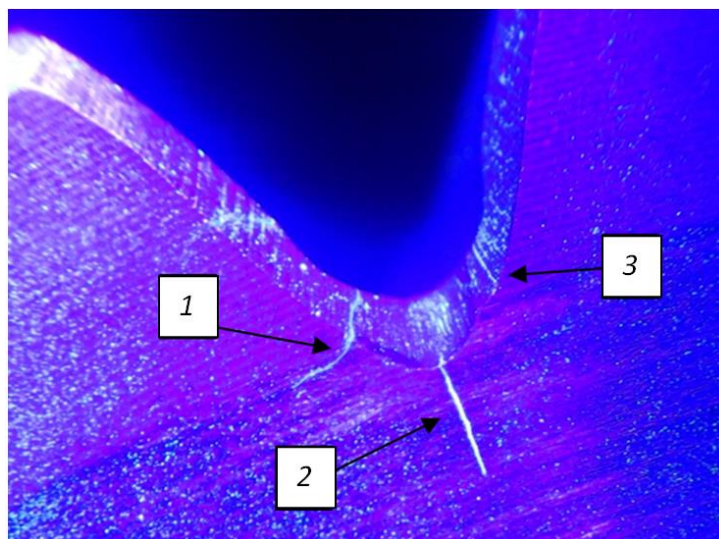
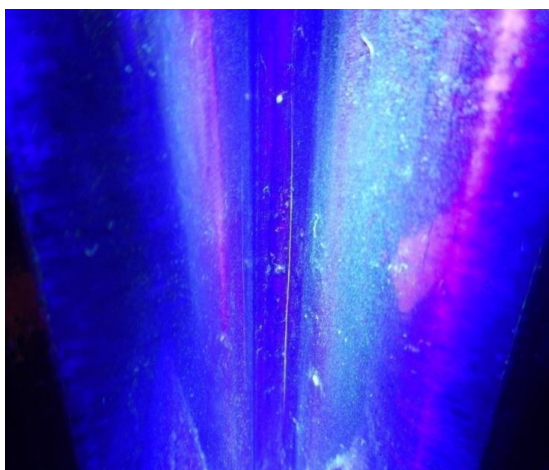
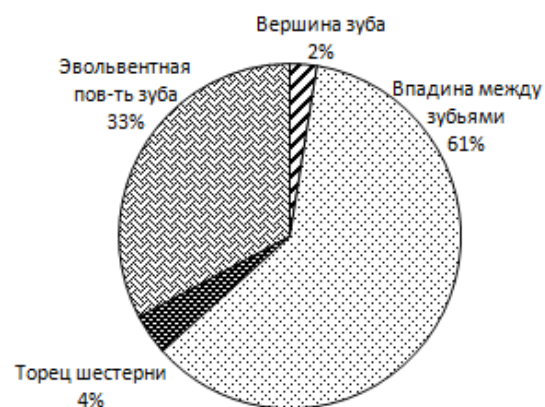


Рис. 2. Индикаторные следы на шестерне: 1 – ложный (нить от ветоши), 2 – трещина, 3 – ложный (от царапины)

Fig. 2. Indicator marks on the gear: 1 – false (thread from rags), 2 – crack, 3 – false (from scratch)



a)



б)

Рис. 3. Характерная картина трещины во впадине а) и соотношение местоположения трещин на контролируемых шестернях б)

Fig. 3. The characteristic pattern of cracks in the cavity a) and the ratio of the location of cracks on the controlled gears b)

При циркуляционном намагничивании число витков гибкого кабеля, продеваемого через отверстие тороидального объекта, определялось по формулам [18]

$$\begin{cases} n = \frac{1,5H(D+d)}{l}, & \text{при } D/d < 10 \\ n = \frac{3HD}{l}, & \text{при } D/d > 10 \end{cases} \quad (1)$$

где H – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля, А/см (принято согласно ГОСТ Р 56512-2015 60 А / см); D – наружный диаметр контролируемого объекта, см; d – внутренний диаметр контролируемого объекта, см; I – сила тока, А (1500 А).

Намагничивание производится посредством

наматывания гибкого кабеля на элементы редуктора витками через сквозное центральное отверстие и включения режима намагничивания. В качестве примера в табл. 1 приведено количество витков и характеристики тороидальной обмотки при контроле деталей редукторов экскаватора Komatsu 1250.

Экспериментально было установлено, что время монтажа тороидальной обмотки на зубчатых венцах диаметром более 500мм начинает превышать время контроля с продольным намагничиванием постоянным или электромагнитом. На этом основании было принято решение использовать циркуляционный метод на шестернях и зубчатых венцах наружным

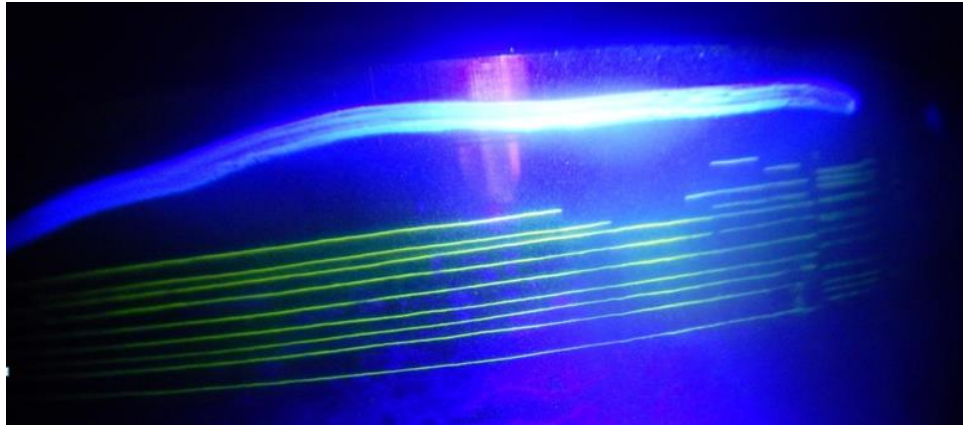


Рис. 4. Скопление трещин поверхности вала
Fig. 4. Accumulation of cracks in the shaft surface

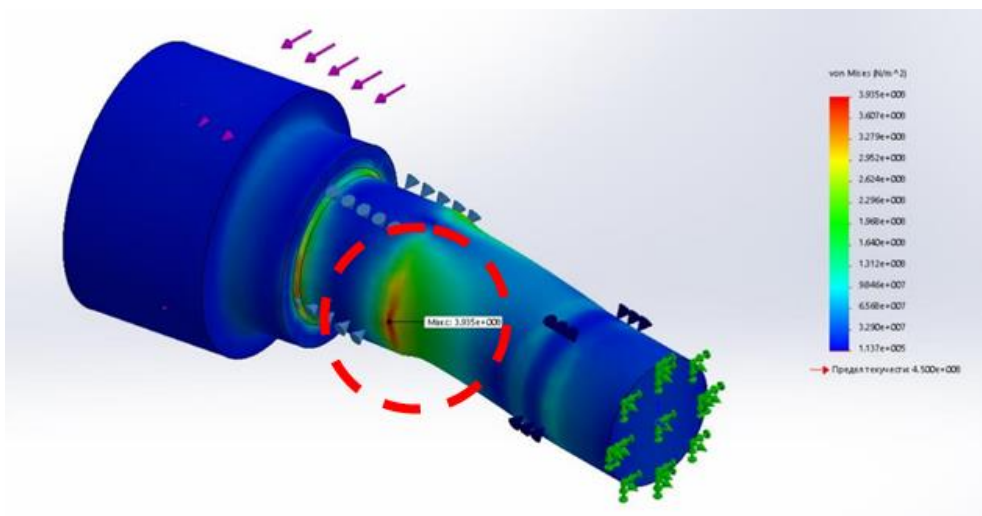


Рис. 5. Модель распределения изгибающих нагрузок на вал в программе «T-FLEX CAD»
Fig. 5. The model of the distribution of bending loads on the shaft in the program «T-FLEX CAD»

диаметром до 500 мм.

Расшифровка результатов контроля и оценка состояния объекта контроля проводились согласно ГОСТ Р ИСО 9934-1-2011, а браковка деталей осуществлялась на основании руководящего документа [19].

Результаты и обсуждение

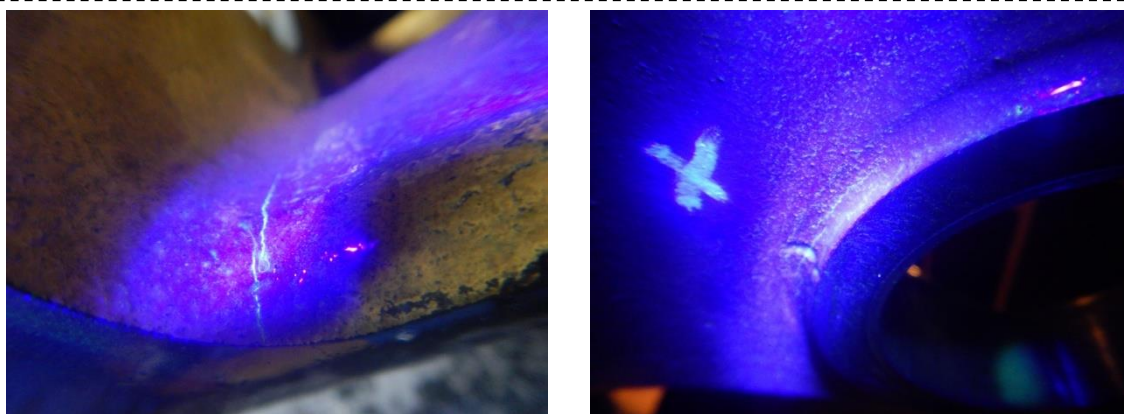
При расшифровке и анализе индикаторных рисунков необходимо отличать ложные осаждения магнитного порошка от его осаждения на реальных дефектах. При отсутствии дефектов осаждения магнитного порошка могут наблюдаться в местах:

- резких переходов от одного сечения контролируемого объекта к другому;
- резкого местного изменения магнитных свойств металла (например, по границе зоны термического влияния или по границе «металл шва – основной металл»);
- касания намагниченного объекта каким-либо ферромагнитным предметом (отверткой, другим инструментом);

- расположения риски, царапины и грубой обработки поверхности;
- границы наклепанной поверхности;
- группы мелких забоин;
- расположения карбидной полосчатости металла.

Индикаторные рисунки, образующиеся на дефектах нарушений сплошности материала после распыления флуоресцентной магнитной суспензии, имеют следующие характерные особенности:

- плоскостные дефекты (трещины, расслоения, несплавления и т. п.) проявляются в виде удлиненных, как правило, тонких индикаторных рисунков в виде валиков магнитного порошка;
- объемные дефекты (поры, раковины, включения) образуют округлые индикаторные рисунки;
- подповерхностные дефекты обычно дают нечеткое осаждение порошка.



а)

б)

Рис. 6. Характерная картина трещины водила по углу спицы а) и приливу отверстия под ось сателлита б)

Fig. 6. A characteristic picture of the crack drove along the corner of the spoke a) and the tide of the hole under the axis of the satellite b)

Значительное снижение качества результатов контроля влекут ложные индикаторные рисунки; в процессе проведения исследований была выявлена единственно возможная зона их проявления (рис. 2). Во впадинах зуба, в зоне фаски, выполненной на заводе-изготовителе, присутствуют царапины – следы мех обработки, на некоторых из которых могут проявляться ложные индикаторы 3. В 65% случаев при повторном намагничивании они не проявляются. В оставшихся случаях достаточно незначительной обработки данной кромки наждачной бумагой.

На рис. 3, а представлена характерная картина трещины во впадине между зубьями шестерни. Обобщенные результаты анализа наличия трещин и скоплений трещин на зубчатых колесах представлены в виде круговой диаграммы на рисунке 3, б. Чаще всего трещины и их скопления возникают во впадине зуба (61%). На эвольвентной поверхности зуба выявлено 33% трещин, 4% трещин выявлено на торце, а 2% – на вершине зуба шестерни. В тоже время установлено, что на внутренней поверхности под вал трещины отсутствуют.

На основании полученных данных использования МЛК для НК зубчатых колес можно утверждать, что применение циркуляционного способа намагничивания для всех шестерен, за исключением крупномодульных зубчатых венцов, является оптимальным решением. Применение в этом случае продольного намагничивания потребует значительных трудозатрат. Кроме этого, при таком способе намагничивания остаются без контроля торцевые поверхности шестерен, а это потеря до 4% дефектов, что является недопустимым результатом.

Для контроля валов применялось продольное намагничивание в двух вариантах – с

использованием постоянного электромагнита и с использованием катушки соленоида. Оба варианта дали одинаковые результаты. Однако трудоемкость варианта с использованием катушки соленоида оказалась на 84% меньше трудоемкости с использованием постоянного магнита.

Результаты НК валов показали, что все трещины возникают на поверхности в районе шейки первого подшипника со стороны шестерни (рис. 4). В других зонах за весь период контроля трещин не выявлено. Это объясняется особенностью нагрузок на исследуемые валы и не отменяет необходимости контроля зон шлицевого соединения на предмет выявления трещин, расположенных вдоль шлицов. Для этого необходимо использовать постоянный магнит, устанавливаемый в крест со шлицом.

На рис. 5 представлены смоделированные в программе «T-FLEX CAD» нагрузки, возникающие при работе контролируемого вала. Так, красным цветом выделена зона возникновения максимальных изгибающих напряжений. Именно в районе данной зоны и происходит трещинообразование. Таким образом, предварительное применение компьютерного моделирования нагрузок на контролируемые детали позволяет сократить объем контроля без снижения его достоверности до 80%, подвергая ему только зоны трещинообразования.

Водило имеет сложную объемную форму, поэтому его МЛК возможен только с применением циркуляционного способа намагничивания с помощью провода с током, продеваемого в отверстие с образованием витков вокруг детали. Так как зона возможных дефектов расположена во внутренней недоступной для намагничивания другими способами части детали, этот способ намагничивания является единственным.

Установлены характерные зоны развития дефектов (рис. 6): а) – внутри водила по углу соединительной спицы и б) внутри водила по приливу под отверстие для оси сателлитов. Несмотря на то, что водило намагничивают полностью, его контроль целесообразно проводить в указанных зонах. Это позволит сократить трудоемкость всего контроля не менее чем на 60% и уменьшить расход материалов не менее чем на 85%.

Выводы

1. Установлено, что время монтажа тороидальной обмотки на зубчатых венцах диаметром более 500 мм начинает превышать время контроля с продольным намагничиванием постоянным или электромагнитом. На этом основании целесообразно применять циркуляционный метод намагничивания только для шестерен и зубчатых венцов наружным диаметром до 500 мм.

2. Для всех шестерен выявлена единственно возможная зона проявления ложных индикаторных рисунков – это впадина зуба в зоне фаски механической обработки. Они в 65% случаев при повторном намагничивании не проявляются. В оставшихся случаях достаточно незначительной обработки данной кромки наждачной бумагой.

3. Применение циркуляционного способа намагничивания для всех шестерен за

исключением крупномодульных зубчатых венцов является оптимальным решением. Применение в этом случае продольного намагничивания потребует значительных трудозатрат. Кроме этого, при таком способе намагничивания остаются без контроля торцевые поверхности шестерен, а это потеря до 4% дефектов, что является недопустимым результатом.

4. Для НК валов возможно применять продольное намагничивание в двух вариантах – с использованием постоянного электромагнита и использованием катушки соленоида. Оба варианта дают одинаковые результаты. Однако трудоемкость варианта с катушкой соленоида оказалась на 84% меньше трудоемкости с использованием постоянного магнита.

5. На валах все трещины возникают на поверхности в районе шейки первого подшипника со стороны шестерни. Подвергая контролю только указанную зону, возможно сокращение объема контроля до 80% без снижения его достоверности.

6. Установлено, что МЛК водила возможен только с применением циркуляционного способа намагничивания. Выявлены характерные зоны развития дефектов. Поэтому его контроль целесообразно проводить только в этих зонах. Это позволит сократить трудоемкость всего контроля не менее чем на 60% и уменьшить расход материалов не менее чем на 85%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arden, H. Resource and reserve valuation practices in countries forming the Russian Commonwealth of Independent States, in Mineral resource and ore reserve estimation / H. Arden, A. Tverdov // The AusIMM guide to good practice: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Monograph 30. – 2014. – P. 825–834.
2. Kovalev, V.A. The Role of Innovative Technologies in Solving Kuzbass Coal Industry Geo-Ecological Problems / V.A. Kovalev, A.A. Khoreshok, O.I. Litvin // The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. – 2016. – P. 287.
3. Плакиткин, Ю.А. Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития / Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина, К.И. Дьяченко // Уголь. – 2016. – №7. – С. 12–16.
4. Экономика России, цифры и факты. Часть 5. Угольная промышленность [Электронный ресурс] // Utmagazine – 2015. – Режим доступа: <http://utmagazine.ru/posts/10449-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-5-ugolnaya-promyshlennost>. – [03.04.2020].
5. Coal Mining Sector Russia // EMIS. – 2013. – URL: <https://www.emis.com/sites/default/files/Russia%20Coal%20Mining%20Sector%20Report.pdf>. – [03.04.2020].
6. Drygin, M.Y. Strategy of Russian coal mining enterprises' excavator park technical state correction / M.Y. Drygin, N.P. Kurychkin, A.A. Bakanov // E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium. – 2017. – P. 03011.
7. Анистратов, К.Ю. Анализ рынка карьерных экскаваторов и самосвалов в РФ и странах СНГ // Горная промышленность. – 2016. – № 2. – С. 16.
8. Шелихов, Г.С. Достоинство и недостатки магнитопорошкового контроля деталей / Г.С. Шелихов, Ю.А. Шелихов, Ю.А. Глазков // Дефектоскопия. – 2011. – № 8. – С. 54–62.
9. Шелихов, Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия / под ред. В.В. Ключева. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 336 с.

10. РД 13-05-2006. Методические рекомендации о порядке проведения магнитопорошкового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах / Нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Серия 28. Неразрушающий контроль. Выпуск 12. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 80 с.
11. Толмачев, И.И. Физические основы и технология магнитопорошкового контроля: учеб. пособие / И. И. Толмачев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 125 с.
12. Бакунов, А.С. Магнитный контроль: учеб. пособие / А.С. Бакунов, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин; под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Издательский дом «Спектр», 2015. – 192 с.
13. Бигус, Г.А. Диагностика технических устройств / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н.А. Быстрова, Д.И. Галкин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 615 с.
14. Потапов, А.И. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 2.: Электромагнитные и магнитные методы дефектоскопии и контроля свойств материалов / А.И. Потапов [и др.]. – СПб.: Нестор-История, 2015. – 440 с.
15. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
16. Шелихов, Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов: практ. пособие / под ред. В.Н. Лозовского. – М.: Гос. предприятие «Науч.-техн. центр «Эксперт», 1995. – 219 с.
17. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль. Россия. 1900-2000 гг.: Справочник / В.В. Клюев [и др.]. М.: Машиностроение, 2002. – 629 с.
18. Клюев, В.В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / В.В. Клюев [и др.]. М.: Машиностроение, 1976. – 391 с.
19. РД-15-14-2008. Методические рекомендации о порядке проведения экспертизы промышленной безопасности карьерных одноковшовых экскаваторов / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Серия 26. Экспертиза промышленной безопасности. Выпуск 9. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2008. – 108 с.

REFERENCES

1. Arden, H. Resource and reserve valuation practices in countries forming the Russian Commonwealth of Independent States, in Mineral resource and ore reserve estimation / H. Arden, A. Tverdov // *The AusIMM guide to good practice: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Monograph* 30. 2014. P. 825-834.
2. Kovalev V.A., Khoreshok A.A., Litvin O.I. The Role of Innovative Technologies in Solving Kuzbass Coal Industry Geo-Ecological Problems // *The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*. 2016. P. 287.
3. Plakitkin Yu.A, Plakitkina L.S., Dyachenko K.I. Ugolnaya promyishlennost Rossii na mirovom rynke uglia: tendentsii perspektivnogo razvitiya [Coal industry of Russia in the global coal market: perspective development trends] // *Ugol [Coal]*. 2016. No. 7. P. 12-16.
4. *Ekonomika Rossii, tsifry i faktyi. Chast 5. Ugolnaya promyishlennost* [Russian economy, figures and facts. Part 5. Coal industry]. *Utmagazine*. 2015. URL: <http://utmagazine.ru/posts/10449-ekonomika-rossii-cifry-i-faktyi-chast-5-ugolnaya-promyishlennost> [accessed: 03.04.2020].
5. Coal Mining Sector Russia // EMIS. 2013. URL: <https://www.emis.com/sites/default/files/Russia%20Coal%20Mining%20Sector%20Report.pdf> [accessed: 03.04.2020].
6. Drygin M.Y., Kurychkin N.P., Bakanov A.A. Strategy of Russian coal mining enterprises' excavator park technical state correction // *E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium*. 2017. P. 03011.
7. Anistratov, K.Yu. Analiz ryinka karernyih ekskavatorov i samosvalov v RF i stranah SNG [Market analysis of mining excavators and dump trucks in the Russian Federation and the CIS countries] // *Gornaya Promyishlennost [Mining]*. 2016. No. 2. P. 16.
8. Shelihov G.S. Dostoinstvo i nedostatki magnitoporshkovogo kontrolya detaley [Advantages and disadvantages of magnetic particle inspection of parts] / Yu.A. Shelihov, Yu.A. Glazkov // *Defektoskopiya [Flaw detection]*. 2011. No. 8. P. 54-62.

9. Shelihov G.S. Magnitoporoshkovaja defektoskopija [Magnetic particle inspection] / ed. V.V. Klyuev. Moscow: Publishing house "Spectrum", 2010. 336 p.
- 10.RD 13-05-2006. Metodicheskie rekomendatsii o poryadke provedeniya magnitoporoshkovogo kontrolya tehnikeskikh ustroystv i sooruzheniy, primenyaemykh i ekspluatiruemykh na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektah [Guidelines on the procedure for conducting magnetic particle inspection of technical devices and structures used and operated at hazardous production facilities] / Normativnyie dokumentyi v sfere deyatel'nosti Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru. Seriya 28. Nerazrushayushchiy kontrol'. Vyipusk 12. [Regulatory documents in the field of activity of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision. Series 28. Non-destructive testing. Issue 12]. Moscow: ZAO NTTs PB, 2010. 80 p.
- 11.Tolmachjov I.I. Fizicheskie osnovy i tehnologija magnitoporoshkovogo kontrolja: ucheb. posobie [Physical foundations and technology of magnetic particle control: schoolbook]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2008. 125 p.
- 12.Bakunov A.S., Gorkunov Je.S., Shherbinin V.E. Magnitnyj kontrol': ucheb. posobie [Magnetic control: schoolbook] / ed. V.V. Klyuev. Moscow: Publishing house "Spectrum", 2015. 192 p.
- 13.Bigus G.A., Daniyev Ju.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. Diagnostika tehnikeskikh ustrojstv [Diagnostics of technical devices]. Moscow: Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2014. 615 p.
- 14.Potapov A.I. jelektromagnitnye i magnitnye metody nerazrushajushhego kontrolja materialov i izdelij [Electromagnetic and magnetic methods of non-destructive testing of materials and products]. Vol. 2: Jelektromagnitnye i magnitnye metody defektoskopii i kontrolja svojstv materialov [Electromagnetic and magnetic methods of flaw detection and control of material properties]. Saint-Petersburg: Nestor-Story, 2015. 440 p.
- 15.Kljuev V.V. Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika: Spravochnik [Non-Destructive Testing and Diagnostics: Reference]. Moscow: Engineering, 2003. 656 p.
- 16.Shelihov G.S. Magnitoporoshkovaja defektoskopija detalej i uzlov: prakt. Posobie [Magnetic particle inspection of parts and assemblies: a practical guide] / ed. V.N. Lozovsky. Moscow: State Enterprise "Scientific and Technical. center "Expert", 1995. 219 p.
- 17.Kljuev V.V. Nerazrushajushhij kontrol'. Rossiya. 1900-2000 gg.: Spravochnik [Unbrakable control. Russia. 1900-2000: Reference]. Moscow: Engineering, 2002. 629 p.
- 18.Kljuev V.V. Pribory dlja nerazrushajushhego kontrolja materialov i izdelij: Spravochnik [Devices for non-destructive testing of materials and products: Reference]. Moscow: Engineering, 1976. 391 p.
- 19.RD-15-14-2008. Metodicheskie rekomendatsii o poryadke provedeniya ekspertizy promyishlennoy bezopasnosti karernykh odnokovshovykh ekskavatorov [Guidelines on the procedure for conducting industrial safety expert reviews of mining shovels] / Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru. Seriya 26. Ekspertiza promyishlennoy bezopasnosti. Vyipusk 9. [Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision. Series 26. Industrial Safety Examination. Issue 9]. Moscow: NTTs «Promyishlennaya bezopasnost» [STC «Industrial Safety»], 2008. 108 p.

Поступило в редакцию 18.04.2020
Received 18 April 2020