

УДК 621.74.047.06:001

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА МЕХАНИЗМА КАЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

**Сотников А.Л.**, к.т.н., доцент кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»,  
начальник научно-исследовательской части (m-lab@ukr.net)

Донецкий национальный технический университет  
(283001, Донецк, ул. Артема, 58)

**Аннотация.** Разработан виброметрический метод диагностирования разрушения эксцентрикового вала привода механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок на основе исследования влияния усталостного разрушения вала на амплитудно-частотную характеристику и уровень вибрации механизма качания. Используя теорию Шенли для определения текущей длины трещины эксцентрикового вала, была выведена зависимость изменения жесткости вала во времени. Исследования данной зависимости показали, что уменьшение жесткости вала приводит к росту суммарного уровня вибрации и спектра колебаний привода механизма качания. Полученные результаты позволили установить границы различия состояния (целостности) эксцентрикового вала привода механизма качания кристаллизатора по уровню вибрации в зависимости от частоты вращения вала двигателя на основе ГОСТ ИСО 10816-1-97. Предложенный виброметрический метод диагностирования привода механизма качания кристаллизатора ориентирован на применение широко доступных портативных анализаторов вибрации.

**Ключевые слова:** эксцентриковый вал, трещина, механизм качания кристаллизатора, машина непрерывного литья заготовок, анализатор вибрации, теория Шенли, метод диагностирования, вибродиагностика.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-334-338

В процессе эксплуатации электромеханического привода шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора (МКК) сортовой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) происходит возникновение и развитие усталостного разрушения эксцентрикового вала, которое, если вовремя его не предупредить, может привести к аварийному разрушению вала с прекращением процесса непрерывной разливки стали по соответствующему ручью машины. Как правило, причина возникновения усталостного разрушения эксцентрикового вала заключается в нарушении технологии сборки и монтажа привода МКК. Эффективным методом предупреждения возникновения на ранней стадии и развития неисправностей является диагностирование и входной контроль оборудования МНЛЗ, нового перед вводом в эксплуатацию или восстановленного после ремонта. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов диагностирования привода МКК для предупреждения усталостного разрушения эксцентрикового вала.

Диагностирование МКК направлено на выявление причин отклонения фактических параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ от заданных значений, а также на наличие дефектов в деталях, являющихся результатом, в первую очередь, усталостного разрушения.

Несмотря на простоту и прочность (статическую и динамическую) конструкции шарнирно-рычажных

МКК, разработки как «Danieli & C. Officine Meccaniche S.p.A.» (Италия), так ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (Краматорск, Украина), эти конструкции имеют уязвимые места, а именно подшипники шарниров рычажного механизма и эксцентриковый вал привода. Износ подшипников шарниров приводит к значительным отклонениям параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ, в результате чего увеличивается вероятность прорыва непрерывнолитого слитка под кристаллизатором, снижается стойкость гильзы кристаллизатора [1] и качество поверхности получаемых заготовок, а также нарушается стабильность процесса разливки стали на МНЛЗ. Разрушение эксцентрикового вала в процессе разливки стали на МНЛЗ является аварийным отказом, в результате которого прекращается разливка с возможным прорывом слитка под кристаллизатором.

Методы диагностирования подшипников шарниров МКК конструкции «Danieli & C. Officine Meccaniche S.p.A.» были разработаны автором в работе [2]. Основаны данные методы на измерении и анализе параметров вибрации МКК [3 – 5].

Разработкой же методов диагностирования технического состояния привода МКК для предупреждения разрушения его эксцентрикового вала никто из исследователей не занимался.

Известно, что в процессе эксплуатации привода МКК в ответ на изменение технического состояния его

деталей и узлов изменяется амплитудно-частотная характеристика привода. Данное свойство амплитудно-частотной характеристики можно использовать для диагностирования, в частности, технического состояния эксцентрикового вала привода МКК.

Разработанная в работе [6] динамическая модель привода МКК ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» позволяет провести исследование влияния на амплитудно-частотную характеристику и уровень вибрации привода разрушения его эксцентрикового вала. При этом разрабатываемые методы диагностирования и контроля должны быть доступны для их реализации в производственных условиях силами обслуживающего персонала МНЛЗ, а также обладать достаточной точностью и достоверностью результатов.

Целью настоящей работы является разработка метода диагностирования технического состояния электро-механического привода МКК на основе исследования влияния на амплитудно-частотную характеристику и уровень вибрации привода механизма качания разрушения его эксцентрикового вала.

Разрушение эксцентрикового вала привода МКК происходит в результате накопления усталостных повреждений при воздействии циклических изгибных напряжений при вращении вала с умеренными напряжениями и наличием локальных концентраторов напряжения [7, 8].

При моделировании разрушения эксцентрикового вала с помощью динамической модели привода МКК [6] полагалось, что развитие трещины в консольной части вала приводит к уменьшению диаметра вала  $d_0$  в опасном сечении, что в свою очередь уменьшает его жесткость. Изменение жесткости во времени описывается следующей зависимостью [9]:

$$k_b(\tau) = k_b(0) \left( \frac{d(\tau)}{d_0} \right)^4; \quad d(\tau) = d_0 - l_{тр}(\tau),$$

где  $k_b(0) = k_{10}$  – исходная жесткость вала при отсутствии в нем трещины;  $d_0 = 49$  мм – исходный диаметр вала в опасном сечении;  $d(\tau)$  – текущий диаметр вала;  $l_{тр}(\tau)$  – текущая длина трещины;  $\tau$  – текущее время с момента зарождения трещины и до разрушения эксцентрикового вала.

Тогда в окончательном виде получим:

$$k_b(\tau) = k_b(0) \left( 1 - \frac{l_{тр}(\tau)}{d_0} \right)^4.$$

Текущая длина трещины рассчитывается на основе теории Шенли [10 – 12] по зависимости

$$l_{тр}(\tau) = d'e^{\ln 1000 \left( \frac{\tau}{T} - 1 \right)},$$

где  $d'$  – диаметр, равный критической длине трещины  $l_{кр}$ , при которой происходит разрушение эксцентрикового вала (в расчете полагалось, что  $d' = d_0$ );  $T$  – наработка вала до разрушения;  $\tau/T$  – относительная наработка эксцентрикового вала привода МКК (изменяющаяся от 0 до 1).

Из результатов исследования амплитудно-частотной характеристики привода МКК при усталостном разрушении эксцентрикового вала, приведенных на рис. 1, следует, что уменьшение жесткости консольной части вала приводит к росту суммарного уровня вибрации редуктора привода МКК примерно в 5 раз. Соответственно изменяется и спектр колебаний (частота его максимума понижается), что является следствием уменьшения суммарной жесткости крепления привода, равной при разрушении эксцентрикового вала жесткости сайлентблока качающейся платформы (рис. 2). Резонансная частота привода при этом снижается с 65 до 20 Гц (в момент разрушения вала), а уровень вибрации в абсолютных значениях повышается с 0,25 до 1,5 мм/с при работе привода с частотой вращения вала двигателя 400 об/мин.

Из графика на рис. 3 следует, что при наработке, составляющей 80 % срока службы дефектного эксцентрикового вала  $T_{долг}$ , трещина занимает 25 % его диаметра. В пересчете на площадь поперечного сечения вала это означает, что порядка 44 % сечения уже «не работает». Это, в свою очередь, приводит к росту в 1,44 раза напряжений, действующих в незатронутом трещиной сечении вала. Учитывая, что типовые запасы прочности в металлургическом машиностроении имеют порядок  $K_{зап} = 1,5 - 2,0$  [7], это свидетельствует о том, что напряжения в опасном сечении вала достигают предельно допустимого уровня. Данное обстоятельство и является

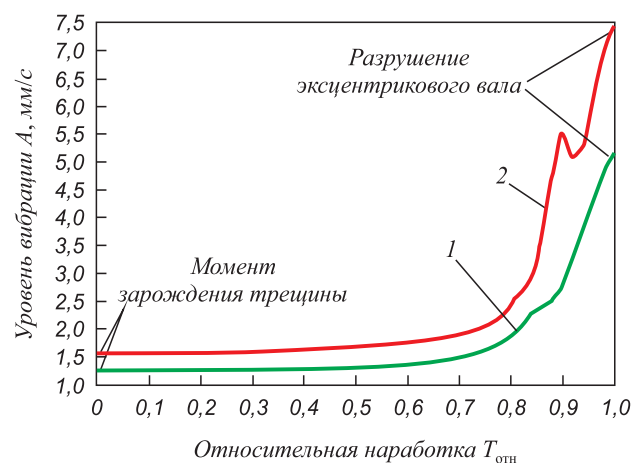


Рис. 1. Изменение суммарного уровня вибрации привода МКК по мере развития трещины в консольной части эксцентрикового вала при  $n$ , об/мин: 1 – 400; 2 – 1200

Fig. 1. Change of total vibration level of the MOM drive at the crack formation in the eccentric shaft console: 1 – 400; 2 – 1200

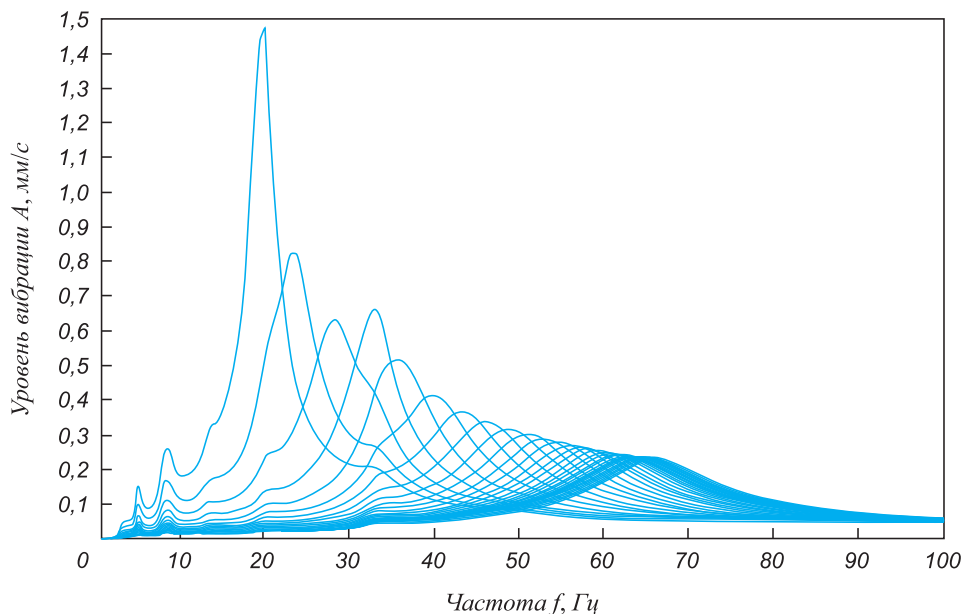


Рис. 2. Изменение спектра вибрации привода МКК по мере развития трещины в консольной части эксцентрикового вала при частоте вращения вала двигателя 400 об/мин

Fig. 2. Change of the vibration spectrum of the MOM drive at the crack formation in the console of the eccentric shaft at the rotational speed of the motor shaft of 400 rpm

причиной возрастания скорости развития трещины на заключительных (предаварийном и аварийном) этапах эксплуатации привода МКК, изменяющемся в пределах  $(0,8 - 1,0)T_{\text{долг}}$ .

Полученные результаты исследования позволяют определить границы различения технического состояния (целостности) эксцентрикового вала по общему уровню вибрации привода МКК (рис. 4, табл. 1, 2).

Учитывая то, что развитие трещины эксцентрикового вала на заключительных (предаварийном и аварийном) этапах эксплуатации привода МКК происходит практически мгновенно, рекомендуется использовать

коэффициент, определяющий границы классов технического состояния вала, равный 1,5, вместо общепринятого 2 согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97.

Для верификации разработанной диагностической модели привода МКК и полученных результатов исследования резонансных явлений и уровня вибрации при изменении технического состояния эксцентрикового вала привода были проведены экспериментальные измерения общего уровня вибрации действующего привода МКК ПАО «Новокраматорский машиностроительный

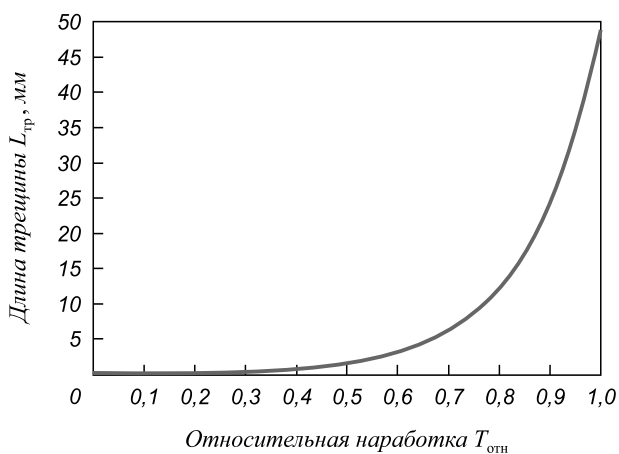


Рис. 3. Изменение длины трещины по мере разрушения эксцентрикового вала

Fig. 3. Change of crack length in the process of destruction of eccentric shaft

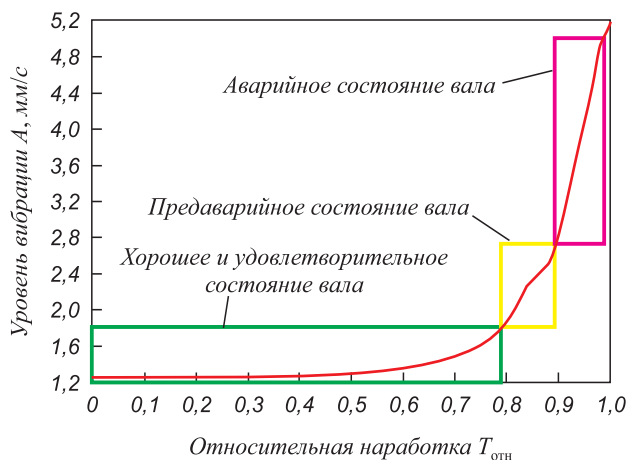


Рис. 4. Границы различения состояния (целостности) эксцентрикового вала по общему уровню вибрации привода МКК на частоте вращения вала двигателя 400 об/мин

Fig. 4. Discernment boundaries of status (integrity) of the eccentric shaft by the vibration level of the MOM drive at the rotational speed of the motor of 400 rpm

Таблица 1

**Границы различения состояния (целостности) эксцентрикового вала по виброскорости привода МКК, мм/с**

**Table 1. Discernment boundaries of status (integrity) of the eccentric shaft by the vibration speed of the MOM drive, mm/s**

Класс технического состояния	Частота вращения вала двигателя, об/мин	
	400	1200
Хорошее	< 1,2	< 1,5
Удовлетворительное	1,2 – 1,8	1,5 – 2,25
Неудовлетворительное (предавварийное)	1,8 – 2,7	2,25 – 3,38
Аварийное	> 2,7	> 3,38

завод» при изменении частоты вращения вала двигателя. В качестве точек измерения параметров вибрации были выбраны точки, расположенные на подшипниковых опорах редуктора и двигателя. Контролируемый частотный диапазон составлял до 1000 Гц, измеряемые параметры вибрации – среднееквадратичное значение виброскорости, временная форма сигнала. Измерения проводились для частот вращения двигателя 400, 800, 1200 и 1600 об/мин.

В качестве измерительного средства был применен анализатор вибрации СД-21 [13–15].

Результаты экспериментального исследования подтвердили точность выполненного нормирования режимов работы и общего уровня вибрации привода МКК и показали достоверность и эффективность разработанного метода диагностирования состояния привода.

**Выводы.** В ходе исследования изменения амплитудно-частотной характеристики привода МКК МНЛЗ при развитии трещины в консольной части эксцентрикового вала установлены границы различения состояния (целостности) вала по уровню вибрации привода в зависимости от частоты вращения вала двигателя на основе ГОСТ ИСО 10816-1-97.

Рекомендуется коэффициент различения границ классов технического состояния эксцентрикового вала по уровню вибрации привода МКК принимать равным 1,5 вместо 2, регламентированного в ГОСТ ИСО 10816-1-97, учитывая мгновенный характер разрушения вала на предаварийном и аварийном этапах эксплуатации.

Разработанный метод диагностирования привода МКК можно реализовать как с применением портативных анализаторов вибрации и виброметров, так и с помощью стационарных систем мониторинга и диагностики. В последнем случае повышается эффективность диагностирования за счет непрерывного отслеживания

Таблица 2

**Нормированные уровни вибрации привода МКК в зависимости от частоты вращения вала двигателя**

**Table 2. Normalized vibration levels of the MOM drive depending on the rotational speed of the motor shaft**

Виброскорость, мм/с	Частота вращения вала двигателя, об/мин	
	400	1200
1,2	A	A
1,5	B	A
1,8		B
2,25	C	B
2,7		C
3,38	D	C
4,05		D
7,07		D

Примечание. Обозначение зон вибрационного состояния привода (A–D) принято в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-1-97.

изменений технического состояния деталей, узлов и механизмов МКК.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M., Gerasimova A.A. Use of electric arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick-walled slab molds // Metallurgist. 2011. Vol. 55(5–6). P. 419–423.
2. Сотников А.Л. Предупреждение отклонений параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ на основе развития методов диагностики механизма качания: Дис. ... канд. техн. наук. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 205 с.
3. Сотников А.Л. Диагностическая модель подшипниковых узлов механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2008. № 4 (15). С. 48–54.
4. Сотников А.Л. Виброметрический метод диагностирования подшипников рычажного механизма кристаллизатора МНЛЗ // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2010. № 3 (22). С. 27–32.
5. Субботин Г., Пустошный Д., Попов В. Вибродиагностика подшипников эксцентриковых валов механизмов качания кристаллизаторов // НМ-Оборудование. 2007. № 2. С. 19–23.
6. Сотников А.Л., Нагорный В.М., Оробцев А.Ю. и др. Нормирование режимов работы и уровня вибрации механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Metallургические процессы и оборудование. 2013. № 1. С. 44–54.
7. Гребеник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности): Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 344 с.
8. Детали машин и основы конструирования: Учебник / С.М. Горбатюк, А.Н. Веремеевич, С.В. Албул и др.; Под ред. С.М. Горбатюка. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 377 с.
9. Жернаков В.С., Куликов В.С., Мардимасова Т.Н. Расчет валов на статическую, усталостную прочность и жесткость: Учеб. пособие. – Уфа: УГАТУ, 2003. – 76 с.
10. Залюга В.А., Нагорный В.В. Расчет индикаторов разрушения режущего инструмента / Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. 2012. № 2. С. 101–111.

11. Кренделл С. Случайные колебания: Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 356 с.
12. Shanley F.R. A theory of fatigue based on unbonding during reversed slip // Report No. P-350. – Santa Monica (USA): The RAND Corporation, 1952. – 93 p.
13. Виброанализатор СД-21. Руководство по эксплуатации. – СПб: ООО «Ассоциация ВАСТ», 2009. – 111 с.
14. Смирнов А.Н., Антыкуз О.В. Комплексный контроль параметров качения кристаллизаторов МНЛЗ / *Металл и литье Украины*. 2009. № 1 – 2. С. 57 – 61.
15. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.

Поступила 9 апреля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 5, pp. 334–338.

## DIAGNOSTICS OF ELECTROMECHANICAL DRIVE OF THE CCM MOLD OSCILLATION MECHANISM

*A.L. Sotnikov*

**Donetsk National Technical University, Donetsk**

**Abstract.** The vibrometry method of diagnosing the destruction of the eccentric shaft of the oscillation mechanism drive of the continuous casting machine mold was developed based on the research of influence of fatigue fracture of the shaft on the amplitude-frequency characteristic and the vibration level of the oscillation mechanism. Using the Shengli theory to determine the current crack length of the eccentric shaft, the dependence of the shaft stiffness variation with time was derived. The study of this dependence has shown that decreasing shaft stiffness leads to the increase of total vibration level and spectrum of fluctuations of the drive of mold oscillation mechanism. The obtained results allowed to establish the discernment boundaries of status (integrity) of the eccentric shaft of the drive of the mold oscillation mechanism by the vibration level depending on the rotational speed of the motor shaft on the basis of GOST ISO 10816-1-97. The proposed vibrometry method for diagnosing the drive of the CCM mold mechanism is focused on the use of widely available portable vibration analyzers.

**Keywords:** eccentric shaft, crack, mold oscillation mechanism, continuous casting machine, vibration analyzer, Shengli theory, method of diagnosing, vibration diagnostics.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-334-338

### REFERENCES

1. Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M., Gerasimova A.A. Use of electric-arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick-walled slab molds. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, Issue 5–6, pp. 419–423.
2. Sotnikov A.L. *Preduprezhdenie otklonenii parametrov kolebatel'nogo dvizheniya kristallizatora MNLZ na osnove razvitiya metodov diagnostiki mekhanizma kachaniya: dis. kand. tekhn. nauk* [The prevention of parameters divergence of oscillatory movement of CC machine crystallizer on the basis of development of tilting mechanism diagnostics techniques: Cand. Sci. Diss.]. Donetsk: DonNTU, 2008, 205 p. (In Russ.).
3. Sotnikov A.L. The diagnostic model for the bearing units of CCM mold oscillation mechanism. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*. 2008, no. 4 (15), pp. 48–54. (In Russ.).
4. Sotnikov A.L. The vibrometry method of diagnosing the bearings of the mold lever mechanism. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*. 2010, no. 3 (22), pp. 27–32. (In Russ.).
5. Subbotin G., Pustoshnyi D., Popov V. Vibration diagnostics of the bearings of the eccentric shafts of the CCM mold oscillation mechanism. *NM-Oborudovanie*. 2007, no. 2, pp. 19–23. (In Russ.).
6. Sotnikov A.L., Nagornyi V.M., Orobtssev A.Y., Ptukha S.V., Rodionov N.A. Regulation of operating modes and vibration level of the CCM mold oscillating mechanism. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2013, no. 1, pp. 44–54. (In Russ.).
7. Grebenik V.M., Tsapko V.K. *Nadezhnost' metallurgicheskogo oborudovaniya (otsenka ekspluatatsionnoi nadezhnosti i dolgovechnosti)*. *Spravochnik* [The reliability of metallurgical equipment (evaluation of operational reliability and durability). Guide]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 344 p. (In Russ.).
8. Gorbatyuk S.M. et al. *Detali mashin i osnovy konstruirovaniya: uchebnyk* [Machine parts and design fundamentals: Textbook]. Gorbatyuk S.M. ed. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2014, 377 p. (In Russ.).
9. Zhernakov V.S., Kulikov V.S., Mardimasova T.N. *Raschet valov na staticheskuyu, ustalostnuyu prochnost' i zhestkost'*: *Uchebnoe posobie* [Calculation of shafts for static, fatigue strength and stiffness: Tutorial]. Ufa: UGATU, 2003, 76 p. (In Russ.).
10. Zaloga V.A., Nagornyi V.V. Calculation of indicators of destruction of the cutting tool. *Visnik SumDU. Seriya Tekhnichni nauki*. 2012, no. 2, pp. 101–111. (In Russ.).
11. Crandall S.H., Mark W.D. *Random Vibrations in Mechanical Systems*. Academic Press, New York, 1963. (Russ.ed.: Crandall S. *Sluchainye kolebaniya*. Moscow: Mir, 1967, 356 p.).
12. Shanley F.R. *A theory of fatigue based on unbonding during reversed slip / The RAND Corporation. Report, no. P-350*. Santa Monica (USA): The RAND Corporation, 1952, 93 p.
13. *Vibroanalizator SD-21. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Vibration analyzer SD-21. Manual]. St. Petersburg: ООО “Ассоциация ВАСТ”, 2009, 111 p. (In Russ.).
14. Smirnov A.N., Antykuz O.V. Comprehensive parameter control of CCM mold oscillation. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2009, no. 1–2, pp. 57–61. (In Russ.).
15. Gol'din A.S. *Vibratsiya rotornykh mashin* [Vibration of rotor machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1999, 344 p. (In Russ.).

### *Information about the authors:*

*A.L. Sotnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants”, Head of the Research Department (m-lab@ukr.net)*

Received April 9, 2016