

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ РОЛИКА НАТЯЖНОЙ СТАНЦИИ ПЕТЛЕНАКОПИТЕЛЯ СТАНА ТАНДЕМА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ 2000

М.Л. Краснов¹, *krasnov.ml@mmk.ru*
П.Л. Качурин¹, *kachurin.pl@mmk.ru*
С.Г. Вишняков¹, *vishnyakov.sg@mmk.ru*
А.О. Чернявский², *a.o.cher@mail.ru*
В.А. Васильев³, *vasilyev_va@list.ru*
Ю.И. Савченко⁴, *jura_sav@mail.ru*
А.Ю. Ницкий⁵, *nitskiy@list.ru*
А.И. Иванов³, *ivanovanat88@gmail.com*

¹ ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³ Научно-технический центр «СИГМА», Челябинск, Россия

⁴ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

⁵ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. При возникновении автоколебаний ролика натяжной станции петленакопителя стана холодной прокатки во время эксплуатации появляются трещины на наружных поверхностях ролика. Определение причин возникновения трещинообразования и оценка остаточного ресурса ролика натяжной станции является актуальной задачей. Разработан цифровой двойник натяжной станции петленакопителя стана холодной прокатки в соответствии с классификацией Майкла Ривса и в соответствии со стандартом ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий». Используемые технологические параметры и диагностические данные, отраженные и сохраненные во внешней по отношению к промышленному объекту среде, представляют собой «цифровую тень». Базы данных технологических и вибрационных параметров стана и ролика натяжной станции объединены графической оболочкой. Построена численная трехмерная модель ролика натяжной станции. Определены собственные формы и собственные частоты колебаний. Нижние собственные формы, полученные расчетом, согласуются с частотами колебаний подшипниковых опор натяжного ролика, сохраненными в цифровом следе стана. На высоких частотах наблюдается смешанная форма колебаний (оболочечные колебания и изгиб полуосей), которая также имеет примерное соответствие на виброграммах цифрового следа. С использованием виртуального промышленного эксперимента связаны виброускорения и циклы нагружения подшипниковых опор натяжной станции. Численная трехмерная модель ролика натяжной станции определяет реальные нагрузки, действующие на торцовые поверхности ролика при возникновении автоколебаний натяжной станции. Информация о частоте и амплитуде колебаний позволяет рассчитать количество циклов нагружений и оценить остаточный ресурс до возникновения трещин на торцовых поверхностях ролика натяжной станции.

Ключевые слова: стан холодной прокатки, натяжная станция петленакопителя, автоколебания, трещинообразование, многоцикловая усталость

Для цитирования: Трещинообразование ролика натяжной станции петленакопителя стана тандема холодной прокатки 2000 / М.Л. Краснов, П.Л. Качурин, С.Г. Вишняков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2023. Т. 23, № 3. С. 63–75. DOI: 10.14529/engin230306

CRACKING OF THE ROLLER OF THE TENSION STATION OF THE LOOP ACCUMULATOR OF THE TANDEM COLD ROLLING MILL 2000

M.L. Krasnov¹, krasnov.ml@mmk.ru
P.L. Kachurin¹, kachurin.pl@mmk.ru
S.G. Vishnyakov¹, vishnyakov.sg@mmk.ru
A.O. Chernjavsky², a.o.cher@mail.ru
V.A. Vasilyev³, vasilyev_va@list.ru
Yu.I. Savchenko⁴, jura_sav@mail.ru
A.Yu. Nitskiy⁵, nitskiy@list.ru
A.I. Ivanov³, ivanovanat88@gmail.com

¹ Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

³ SIGMA Scientific and Technical Center, Chelyabinsk, Russia

⁴ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

⁵ Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. In the event of self-oscillation of the roller of the tension station of the loop accumulator of the cold rolling mill, cracks appear on the outer surfaces of the roller during operation. Determining the causes of cracking and assessing the residual life of the roller of the tension station is an urgent task. A digital double of the tension station of the loop accumulator of the cold rolling mill has been developed in accordance with the classification of Michael Reeves and in accordance with the standard GOST R 57700.37-2021 “Computer models and modeling. Digital doubles of products”. The technological parameters and diagnostic data used, reflected and stored in an environment external to the industrial facility, represent a “digital shadow”. Databases of technological and vibration parameters of the mill and the roller of the tension station are combined by a graphical shell. A numerical 3-dimensional model of a tensioning station roller is constructed. The eigenforms and eigenfrequencies of the oscillations are determined. The lower eigenforms obtained by calculation are consistent with the vibration frequencies of the bearing supports of the tensioning roller stored in the digital footprint of the mill. At high frequencies, a mixed form of oscillations is observed (shell oscillations, and bending of the semi-axes) which also has an approximate match on the vibrograms of the digital footprint. Vibration acceleration and loading cycles of the bearing supports of the tension station are associated with the use of a virtual industrial experiment. The numerical 3-dimensional model of the tensioning station roller determines the real loads acting on the end surfaces of the roller when self-oscillations of the tensioning station occur. Information about the frequency and amplitude of vibrations allows you to calculate the number of loading cycles and estimate the residual resource before cracks occur on the end surfaces of the roller of the tension station.

Keywords: cold rolling mill, tension station of the loop accumulator, self-oscillation, cracking, multi-cycle fatigue

For citation: Krasnov M.L., Kachurin P.L., Vishnyakov S.G., Chernjavsky A.O., Vasilyev V.A., Savchenko Yu.I., Nitskiy A.Yu., Ivanov A.I. Cracking of the roller of the tension station of the loop accumulator of the tandem cold rolling mill 2000. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2023:23(3):63–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin230306

Введение

На станах холодной прокатки, совмещенных с непрерывным травильным агрегатом, при определенных условиях возникают автоколебания роликов натяжных станций. Это происходит в тот момент, когда станом выполняются мероприятия по удалению неметаллических включений в полосу прокатываемого металла. Интеллектуальная система определяет наличие дефекта, момент подхода дефекта к клетки № 1 и выдает сигнал на останов стана. Разводятся рабочие валки на 15 мм, и полоса со скоростью от 0,5 до 1,0 м/с перематывается на вторую моталку. В этот мо-

мент, когда стан фактически стоит с разведенными рабочими валками, происходят автоколебания роликов натяжных станций [1]. Автоколебания приводят к возникновению окружных трещин на торцовых поверхностях роликов натяжных станций (рис. 1).



Рис. 1. Окружная трещина, зародившаяся в районе оси
Fig. 1. A circumferential crack that originated in the area of the axis

При нормальной прокатке частота вращения роликов не превышает 45–60 об/мин. Аналогом таких механических систем могут быть сверхнизкочастотные высоконагруженные механизмы, например, ветрогенераторы большой мощности [2–4]. Динамические нагрузки таких машин более чем в 2000 раз меньше чем машины с частотой вращения 3000 об/мин (50 Гц) [5, 6]. Оценка остаточного ресурса с учетом трещинообразования требует построения трехмерной численной модели [7] для определения собственных частот и собственных форм колебаний, определения вынужденных колебаний и одновременно подсчета реального числа количества циклов нагружения [8, 9].

Количество циклов нагружения можно определить, только если существует база данных длительного хранения технологических и диагностических параметров. Таким образом, необходимо существование физического объекта контроля, в нашем случае ролика натяжной станции, база данных длительного хранения и виртуальная модель объекта контроля, в нашем случае численная трехмерная модель динамики ролика натяжной станции.

Объект, состоящий из трех частей: а) физический объект контроля в реальном пространстве; б) виртуальная модель объекта контроля и диагностики в виртуальном пространстве; в) взаимосвязи данных и информации, которые связывают виртуальные и реальные объекты в единое целое, представляет собой «Цифровой двойник» (Digital Twin), определение предложено Майклом Гривсом в 2014 году [10].

Сложность используемого цифрового двойника определяется задачей диагностики. Численная модель может быть сложной трехмерной, мультидисциплинарной или более простой, не требующей больших вычислительных мощностей. Это может значительно уменьшить размер моделей и обеспечить быструю обработку [11].

Эти модели позволяют современным продуктам моделирования визуализировать и моделировать сложные системы, включая их физическое поведение, в режиме реального времени и с приемлемыми вычислительными затратами [12].

Еще одно определение цифрового двойника – это «соответствующим образом синхронизированная совокупность полезной информации (структура, функции и поведение) физического объекта в виртуальном пространстве с потоками информации, которые обеспечивают конвергенцию между физическим и виртуальным состояниями. Цифровой двойник может существовать на любом этапе жизненного цикла и нацелен на использование аспектов виртуальной среды, вычислительных методов и аспектов физической среды для улучшения элементов продукта в течение жизненного цикла» [13].

В работе [14] представлен прототип цифрового двойника на примере модельной среды для интеллектуальных автомобилей, которые могут перенастраиваться во время эксплуатации. В работе [15] определены основные характеристики цифрового двойника в течение всего жизненного цикла изделия. Обзор научной литературы по теме «цифровые двойники в промышленности» приведен в работе [16]. В работах Дозорцева В.М. [17, 18] анализируется история возникновения и базовые технологии построения цифровых двойников. Анализ использования имитационных моделей при построении цифровых двойников проведен в работах [19–22]. И, наконец, в 2021 году принят стандарт ГОСТ Р 57700.37 по проблемам компьютерного моделирования и разработки цифровых двойников [23].

Система связи физического объекта и его цифрового двойника оставляет цифровую тень. Термин цифровая тень (Digital Shadow) появился при работе с Интернетом. Пассивный цифровой след пользователь оставляет ненамеренно, он получается автоматически из данных, которые получают и сохраняют автоматически. Активный цифровой след – это информация, которой пользователь делится по собственному желанию [24]. Сравнительному анализу отличия цифровых двойников и цифровых теней посвящена работа [25]. Цифровые тени, которые представляют собой системы связей и зависимостей, приближенно описывающих поведение реального объекта, подробно описаны в работе [21]. Цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор больших данных, но не позволяет моделировать ситуации, в которых реальный объект ещё не эксплуатировался – «цифровая тень обладает лишь свойством памяти» [26].

При проведении промышленного эксперимента, как правило, используются технологические параметры или диагностические данные, отраженные и сохраненные во внешней по отношению к промышленному объекту среде, т. е. используется «цифровая тень». Фирмой «СИГМА» разработана и внедрена система контроля, сбора и длительного хранения технологических параметров стана холодной прокатки 2000. Система хранения представляет собой гибридную базу данных, включающую в себя, кроме технологических параметров, данные виброконтроля. Вибродатчики установлены на подшипниковых опорах ролика натяжной станции. Вибропараметры собираются и хранятся в отдельной базе данных. Базы данных технологических и вибрационных параметров объединены графической оболочкой. По вибрационным параметрам определяется момент возникновения автоколебаний стана. Технологические параметры позволяют связать возникновение автоколебаний ролика натяжной станции с процессом прокатки на стане.

Численная модель ролика петленакопителя

Ролики натяжной станции петленакопителя представляют собой сварные конструкции, состоящие из цилиндрической обечайки (стальной с полиуретановым покрытием), двух полуосей и соединяющих полуоси с обечайкой диафрагм (по 2 с каждой стороны ролика) (рис. 1).

Ролики разрушаются путем образования окружных трещин в торцевых поверхностях (рис. 2). Ролики нагружены силами, связанными с натяжением проката. Кроме того, в процессе работы возникают динамические нагрузки, проявляющиеся, в частности, в виде вибраций подшипниковых опор.

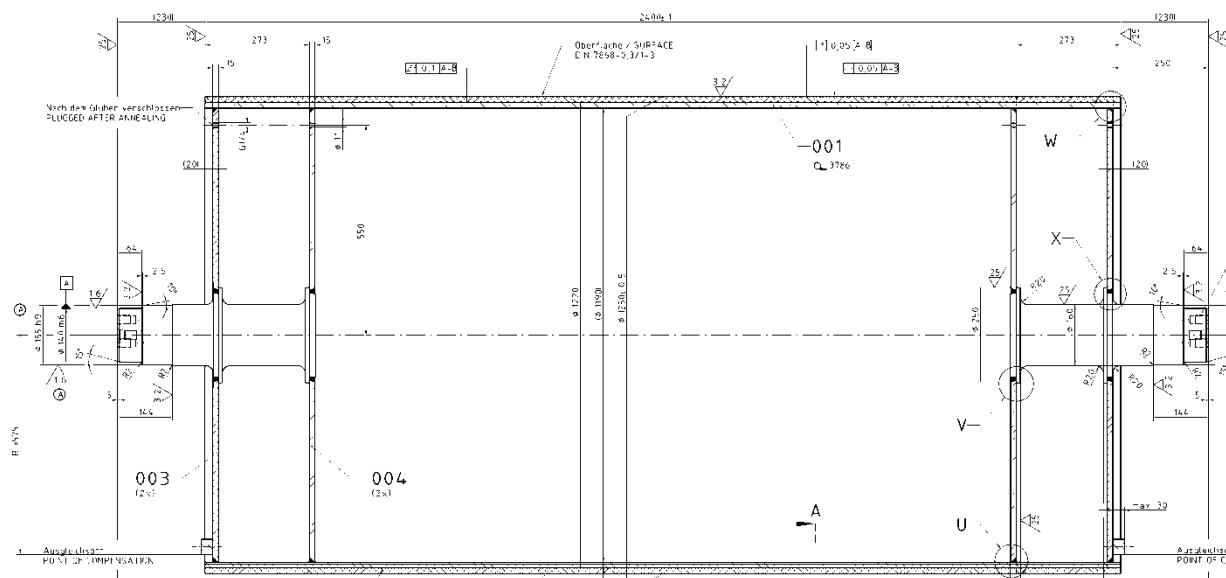


Рис. 2. Конструкция ролика натяжной станции петленакопителя
Fig. 2. Construction of the roller of the tensioning station of the loop accumulator

Расчет напряжений, вызванных натяжением проката, выполнялся методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Величина и характер распределения этих усилий по поверхности валка зависит от величины натяжения и свойств проката (жесткости

ленты). Строго говоря, это контактная задача, которая может быть решена с привлечением соответствующих алгоритмов.

Однако несложно показать, что напряжения вблизи оси ролика зависят в основном от величины нагрузки; характер распределения сил по окружности ролика влияет на эти напряжения в гораздо меньшей степени, и на этапе оценочных расчетов этим влиянием можно пренебречь. Показать это можно, например, рассматривая 2 расчетные схемы: давление полосы равномерно распределено по сектору в 180° – рис. 3а, и давление распределено по узкому сектору – рис. 3б (первая схема соответствует контакту «мягкой» полосы, огибающей ролик, вторая – «жесткой» полосы).

Различие напряжений в районе оси ролика для этих 2 схем нагружения не превышает 10 %. По-видимому, это можно принять в качестве доказательства того, что более точная модель – с детальным расчетом распределения нагрузки по поверхности ролика – не нужна, поскольку усложнение здесь не повлияет на выводы.

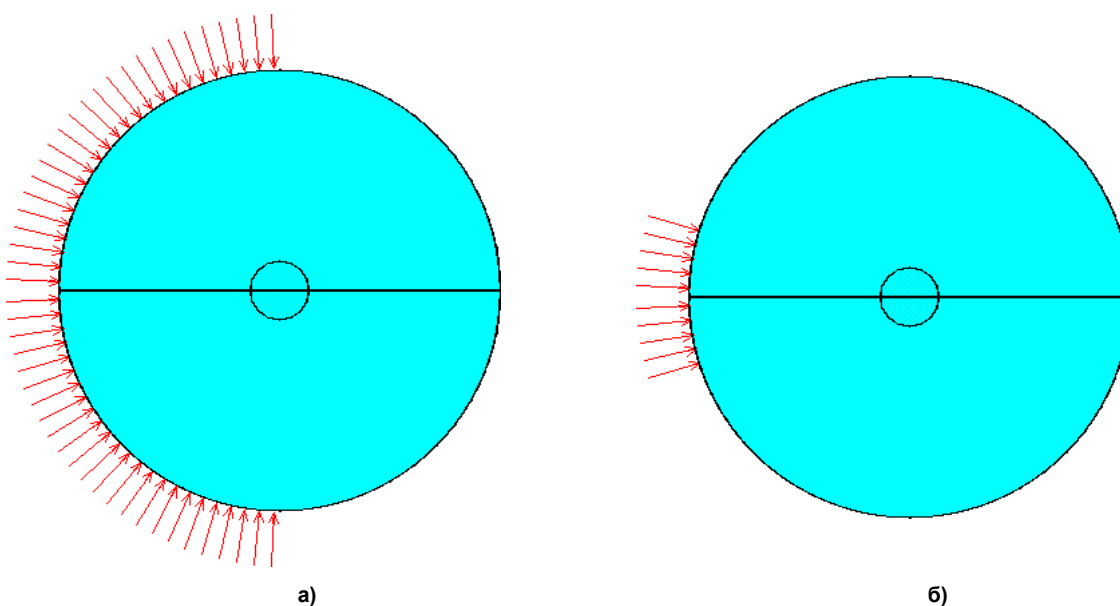


Рис. 3. Характер распределения давления
Fig. 3. The nature of the pressure distribution

Наибольшие напряжения возникают во внешних пластинах в районе приварки оси – рис. 4. Можно заметить, что напряжения на наружной и внутренней стороне пластины заметно отличаются, что говорит о значительной доле изгиба: жесткость полуоси и расстояние между пластинами (в существующей конструкции) недостаточно велики, чтобы сделать изгиб полуоси малым и не влияющим на распределение напряжений (и снизить тем самым напряжения).

На рис. 5 показаны радиальные и окружные напряжения в пластинах. Видно, что наибольшими являются радиальные напряжения вблизи оси (красная зона на верхнем рисунке). Вызываемое ими разрушение должно иметь характер окружных трещин вблизи оси, подобных показанным на рис. 2.

Максимальная величина напряжений при натяжении полосы 60 тс – 120 МПа (рис. 4). Для оценки долговечности при таких напряжениях была построена кривая усталости. Использована оценочная методика восстановления кривой усталости по свойствам при однократном нагружении, приведенная в [27]. Свойства стали 17ГС соответствуют ГОСТ 5520-79 [28] (сортамент – листы толщиной до 20 мм): предел текучести $\sigma_{0.2} = 335$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 490$ МПа, удлинение при разрыве $\delta_5 = 23$ %, поперечное сужение $\psi = 60$ %. При оценке кривой усталости по [29] коэффициенты запаса по напряжениям и числу циклов не учитывались, принимались равными 1, поскольку оценивалось не допустимое число циклов, а число циклов до образования (наблюдаемой в эксплуатации) трещины. Полученная оценка кривой усталости показана на рис. 6 (использованы «условные упругие напряжения» по терминологии [29], которые вычисляются с

учетом пластических деформаций и могут оказаться выше предела прочности, но при напряжениях меньше предела текучести – как в рассматриваемом случае – совпадают с действующими напряжениями).

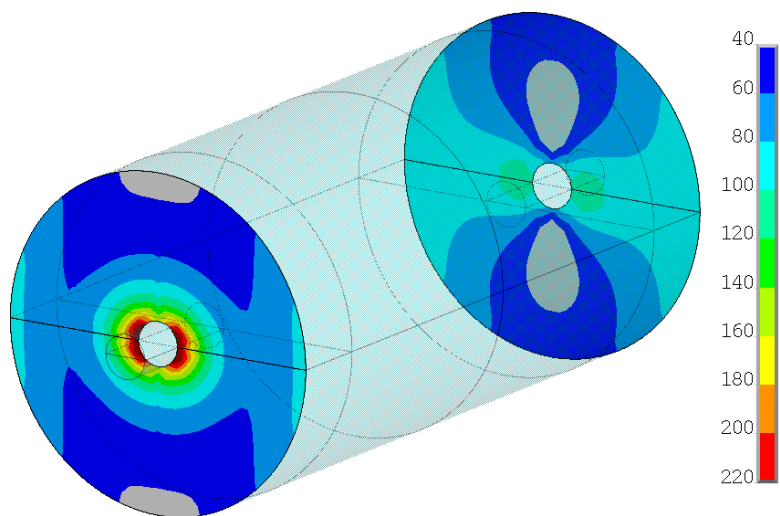


Рис. 4. Эквивалентные напряжения в конструкции при нагружении по схеме рис. 3а (шкала в МПа)
Fig. 4. Equivalent stresses in the structure under loading according to the scheme Fig. 3a (scale in MPa)

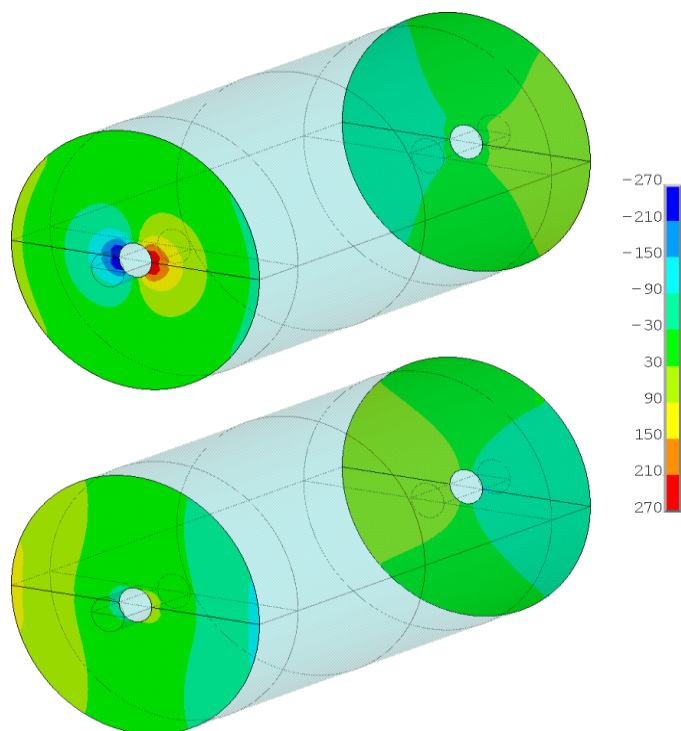


Рис. 5. Радиальные (верхний рисунок) и окружные (нижний рисунок) напряжения в конструкции при нагружении по схеме рис. 3а (шкала в МПа)
Fig. 5. Radial (upper figure) and circumferential (lower figure) stresses in the structure under loading according to the scheme Fig. 3 a (scale in MPa)

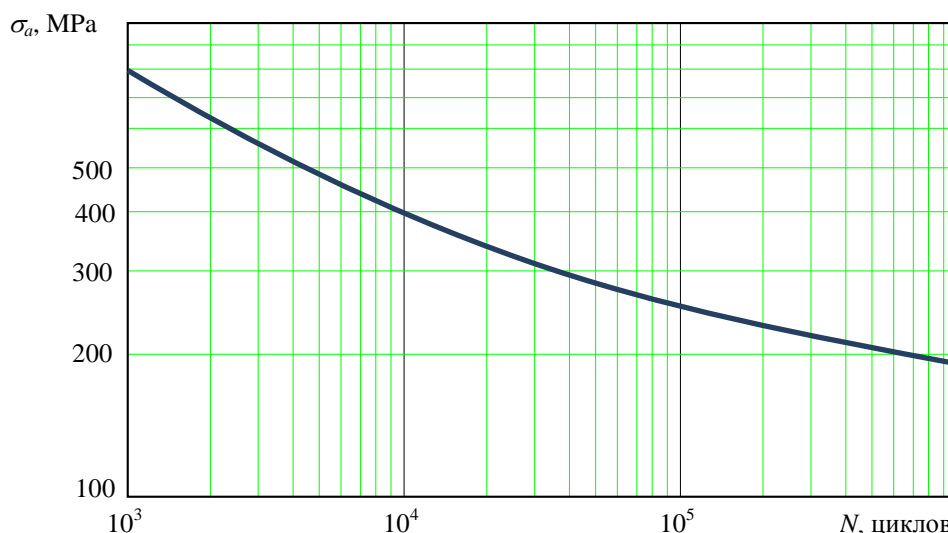


Рис. 6. Расчетная кривая усталости (пояснения в тексте)
Fig. 6. Calculated fatigue curve (explanations in the text)

Рассчитанные напряжения при натяжении полосы 60 тс (рис. 4, 5) соответствуют долговечности примерно 105 циклов (оборотов ролика). Напряженное состояние ролика определяется не только равномерным вращением полосы, но и наблюдаемыми вибрациями. Для оценки возможного влияния вибраций прежде всего были рассчитаны собственные частоты и формы колебаний ролика; некоторые формы показаны на рис. 7 (для наглядности ролик показан в разрезе).

Нижним собственным формам – с расчетными частотами 27,9; 96,5 и 151,5 Гц – отвечают довольно заметные пики на виброграммах (рис. 8). При этом частота 27,9 Гц связана с продольными (вдоль оси) колебаниями ролика, а частоты 96,5 и 151,5 Гц – с поперечными (1-я и 2-я форма изгибных колебаний ролика как балки). Далее следуют довольно многочисленные оболочечные формы колебаний, когда цилиндрическая поверхность ролика становится волнистой – но это не сопровождается перемещением полуосей и, соответственно, не проявляется на виброграммах. При частоте 458,1 Гц (рис. 7) наблюдается смешанная форма – и оболочечные колебания, и изгиб полуосей, которая также имеет примерное соответствие на виброграммах.

Виртуальный промышленный эксперимент

Для оценки того, как сказываются наблюдаемые колебания (рис. 8) на напряженном состоянии, был проведен гармонический анализ – определение зависимости максимальных напряжений около оси ролика от направления и частоты колебаний опор. Результаты этого анализа показаны на рис. 9. Для учета того, как огибающая ролик полоса влияет на колебания, рассматривалось 2 варианта: свободный ролик (не связанный с полосой) и ролик, по половине окружности которого распределена некоторая масса (приведенная масса полосы). Величина этой массы выбиралась (пока) произвольно – для оценки направления и величин возможных эффектов. Из рис. 9 видно, что наличие присоединенной массы ожидаемо сдвигает собственные частоты в сторону более низких, но этот сдвиг относительно невелик и не сопровождается качественными изменениями.

На рис. 9 обращает на себя внимание, прежде всего, пик в области низких частот на характеристике, соответствующей продольным (осевым) колебаниям ролика (нижняя часть рисунка). На виброграммах (см. рис. 8) в области низких частот продольных колебаний наблюдается заметный сигнал. Это означает, что ролик действительно совершает низкочастотные (до 50 Гц) колебания в осевом направлении. Эти колебания приводят к изгибу пластин, соединяющих барабан ролика с полуосями (низшая собственная форма на рис. 7). Из-за низкой жесткости пластин в этом направлении напряжения оказываются существенными (см. рис. 9) и могут сильно влиять на долговечность.

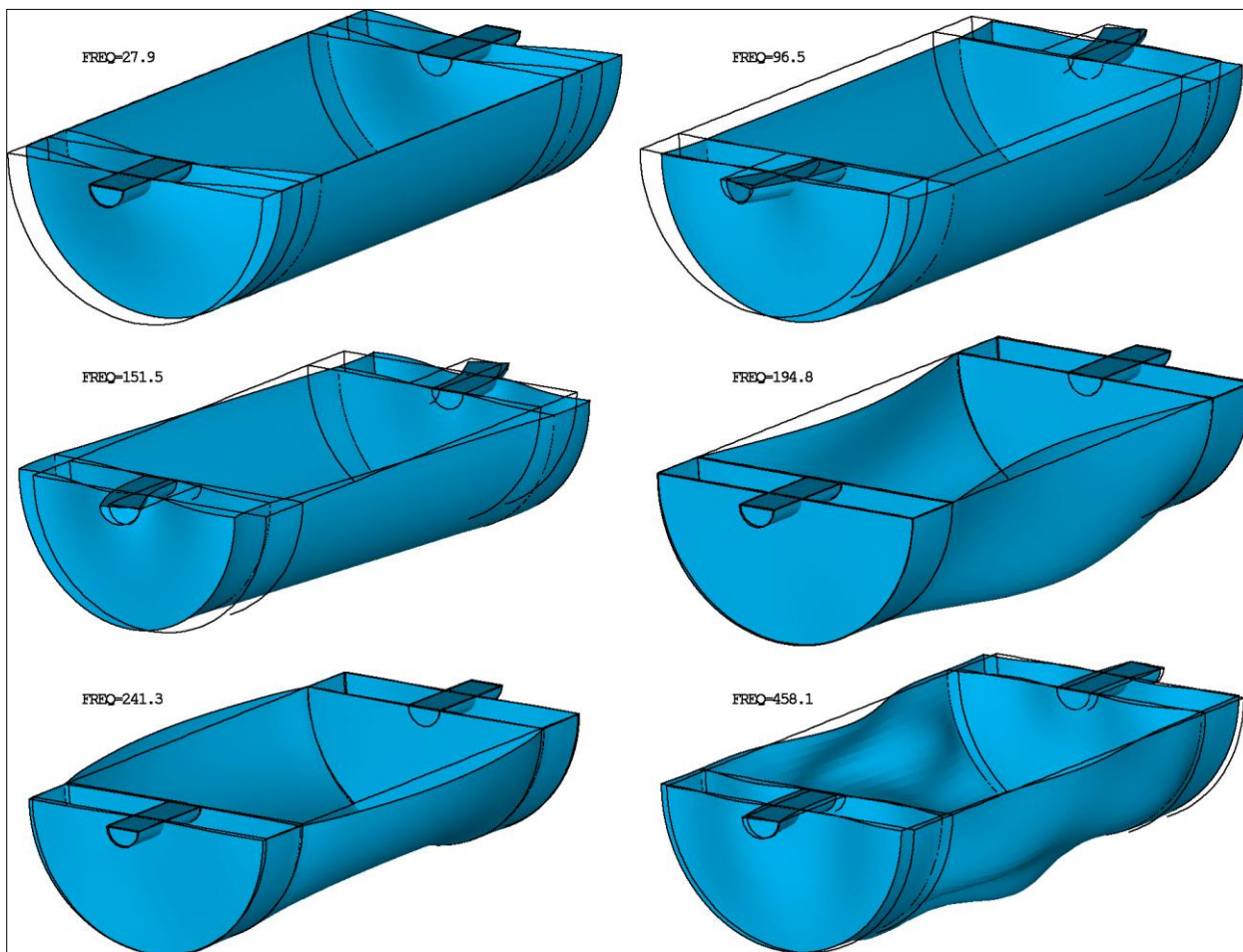


Рис. 7. Некоторые собственные формы и соответствующие им частоты колебаний
(часть оболочечных форм не показана)
Fig. 7. Some eigenforms and their corresponding oscillation frequencies (some shell forms are not shown)

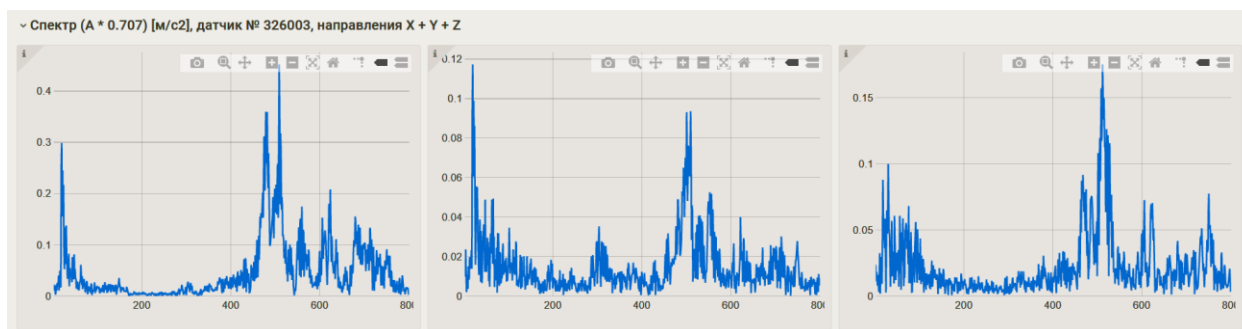


Рис. 8. Виброграммы (пример)
Fig. 8. Vibrograms (example)

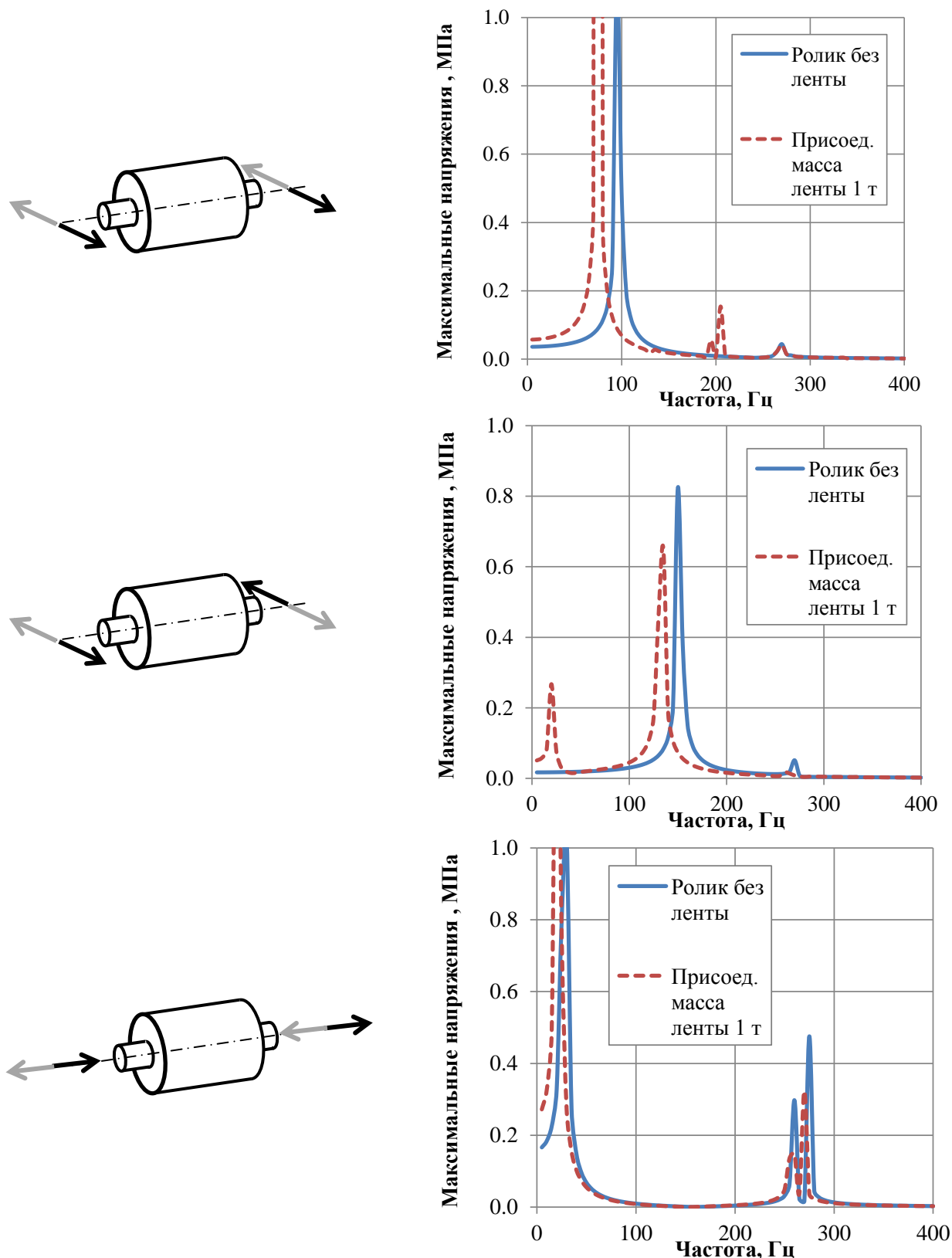


Рис. 9. Зависимости максимальных напряжений около оси ролика от направления и частоты колебаний опор при амплитуде виброускорений на опорах 1g

Fig. 9. The dependence of the maximum stresses near the roller axis on the direction and frequency of vibrations of the supports with the amplitude of vibration accelerations on the supports 1g

Выводы

Построена численная трехмерная модель ролика натяжной станции. Определены собственные формы и собственные частоты колебаний.

Численная трехмерная модель ролика натяжной станции определяет реальные нагрузки, действующие на торцовые поверхности ролика при возникновении автоколебаний натяжной станции. Информация о частоте и амплитуде колебаний позволяет рассчитать количество циклов нагружений и оценить остаточный ресурс до возникновения трещин на торцовых поверхностях ролика натяжной станции.

Список литературы

1. Автоколебания натяжных станций травильного агрегата, совмещенного со станом тандемом холодной прокатки 2000 / М.Л. Краснов, П.Л. Качурин, С.Г. Вишняков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2023. Т. 23, № 2. С. 61–71. DOI: 10.14529/engin230206
2. Bechhoefer E., Schlanbusch R., Waag T.I. Fault Detection on Large Slow Bearings // European conference of the prognostics and health management society. 2016. P. 1–8.
3. Bechhoefer E. Condition Based Maintenance Fault Database for Testing Diagnostics and Prognostic Algorithms. MFPT, 2013.
4. Bechhoefer E., Fang A. Algorithms for embedded PHM // 2012 IEEE Conference on Prognostics and Health Management, 2012, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ICPHM.2012.6299539.
5. Health Indicator for Low-Speed Axial Bearings Using Variational Autoencoders / M. Hemmer, A. Klausen, H. Van Khang, K.G. Robbersmyr, T.I. Waag // IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 35842–35852. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974942.
6. Stamboliska Z., Rusiski E., Moczko P. Proactive Condition Monitoring of Low-Speed Machines. Switzerland: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-10494-2.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann. Oxford, 2005.
8. Stelzmann U., Groth C., Müller G. FEM für Praktiker: Strukturodynamik: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Strukturodynamik – Lösungen mit dem FE-Programm ANSYS 9/ 10; mit zahlreichen Beispielen auf CD-ROM. Expert-Verlag, 2006. 447 p.
9. Guido Dhondt. The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications. Wiley, 2004. 340 p. DOI: 10.1002/0470021217
10. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White Paper. LLC. 2014. P. 1–7.
11. Grieves M., Vickers J. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
12. Grieves M. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises // International Journal of Product Development. 2005. Vol. 2(1/2). P. 71–84.
13. Hicks B. Industry 4.0 and Digital Twins: Key lessons from NASA. URL: <https://www.thefuturefactory.com/blog/24>
14. Abramovici M., Göbel J.Ch., Savarino Ph. Reconfiguration of Smart Products during their Use Phase based on Virtual Product Twins // IFIP International Conference on Product Lifecycle Management PLM. 2017. P. 489–498. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.042
15. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20, № 6. С. 815–827. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827
16. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 517–531.
17. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников // Автоматизация в промышленности. 2020. № 9. С. 3–11.

18. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 2. Ключевые технологии цифровых двойников. Типы моделирования физического объекта // Автоматизация в промышленности, 2020. № 11. С. 3–11.
19. Петров А.В. Имитация как основа технологии цифровых двойников // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2018. № 10 (141). С. 56–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66.
20. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики // Онтология проектирования. 2020. Т. 10, № 3. С. 327–337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337
21. Коровин Г.Б. Возможность применения цифровых двойников в промышленности // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 8. С. 124–133. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133
22. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубежным участием. СПб.: Политех-Пресс, 2019. С. 234–245. DOI: 10.18720/ИЕР/2019.3/25.
23. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2021. 23 с.
24. Лаборатория Касперского, что такое цифровой след? 2022. URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-a-digitalfootprint>.
25. Анохов И.В. Цифровая тень как инструмент для исследования отрасли // E-Management. 2022. Т. 5, № 1. С. 80–92.
26. Крылов И.А. Моделирование и визуализация «цифровой тени» человека на предприятиях // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2021. Т. 5. С. 102–111. DOI: 10.21686/2413-2829-2021-5-102-111
27. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
28. ГОСТ 5520-79 Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1979. С. 16.
29. ГОСТ 25859-83 Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках. М.: Изд-во стандартов, 1983. С. 36.

References

1. Krasnov M.L., Kachurin P.L., Vishnyakov S.G., Savchenko Yu.I., Vasilyev V.A., Nitskiy A.Yu., Ivanov A.I. Self-oscillation of the tension stations of an etching unit combined with the tandem cold-rolling mill 2000. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*. 2023. Vol. 23, No. 2, pp. 61–71. DOI: 10.14529/engin230206 (In Russ.)
2. Bechhoefer E., Schlanbusch R., Waag T.I. Fault Detection on Large Slow Bearings/Eric Bechhoefer, Rune Schlanbusch and Tor Inge Waag. *European conference of the prognostics and health management society*, 2016, pp. 1–8.
3. Bechhoefer E. Condition Based Maintenance Fault Database for Testing Diagnostics and Prognostic Algorithms. *MFPT*, 2013.
4. Bechhoefer E., Fang A. Algorithms for embedded PHM. *2012 IEEE Conference on Prognostics and Health Management*, 2012, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ICPHM.2012.6299539.
5. Hemmer M., Klausen A., Khang H. Van, Robbersmyr K.G., Waag T.I. Health Indicator for Low-Speed Axial Bearings Using Variational Autoencoders. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 35842–35852. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974942.
6. Stamboliska Z., Rusiski E., Moczko P. *Proactive Condition Monitoring of Low-Speed Machines*, 1st ed. Cham, Switzerland: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-10494-2.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann. Oxford, 6th ed., 2005.
8. Stelzmann U., Groth C., Müller G. *FEM für Praktiker: Strukturdynamik: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Strukturdynamik – Lösungen mit dem FE-Programm ANSYS 9/10*; mit zahlreichen Beispielen auf CD-ROM. Expert-Verlag, 2006. 447 p.

9. Guido Dhondt. *The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications*. Wiley, 2004. 340 p. DOI: 10.1002/0470021217
10. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White Paper. LLC, 2014, pp. 1–7.
11. Grieves M., Vickers J. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham, Springer, 2017, pp. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
12. Grieves M. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*. 2005. Vol. 2(1/2), pp. 71–84.
13. Hicks B. *Industry 4.0 and Digital Twins: Key lessons from NASA*, URL: <https://www.thefuturefactory.com/blog/24>
14. Abramovici M., Göbel J.Ch., Savarino Ph. Reconfiguration of Smart Products during their Use Phase based on Virtual Product Twins. *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management PLM*. 2017, pp 489–498. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.042
15. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. [Application of the concept of digital twins at the stages of the life cycle of production systems]. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, No. 6, pp. 815–827. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827 (In Russ.)
16. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. [Digital twins in industry: history of development, classification, technologies, use scenarios]. *News of universities. Instrumentation*. 2021, vol. 64, No. 7, pp. 517–531. (In Russ.)
17. Dozortsev V.M. [Digital twins in industry: genesis, composition, terminology, technologies, platforms, prospects. Part 1. The emergence and formation of digital twins. How existing definitions reflect the content and functions of digital twins]. *Automation in industry*, 2020. No. 9, pp. 3–11. (In Russ.)
18. Dozortsev V.M. [Digital twins in industry: genesis, composition, terminology, technologies, platforms, prospects. Part 2. Key technologies of digital twins. Types of modeling of a physical object]. *Automation in industry*, 2020. No. 11, pp. 3–11. (In Russ.)
19. Petrov A.V. [Imitation as the basis of digital twin technology]. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2018. No. 10 (141). pp. 56–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66. (In Russ.)
20. Massel L.V., Vorozhtsova T.N. [Ontological approach to the construction of digital twins of energy objects and systems]. *Design Ontology*, 2020, vol. 10, No. 3, pp. 327–337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337
21. Korovin G.B. [Possibility of using digital twins in industry] *Bulletin of Transbaikal State University*, 2021, vol. 27. No. 8, pp. 124–133. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133
22. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. [Digital twins: definition, approaches and development methods]. *Digital transformation of the economy and industry: Collection of scientific and practical works conference with foreign participation*. St. Petersburg, 2019, pp. 234–245. DOI: 10.18720/IEP/2019.3/25.
23. State standard 57700.37–2021 *Komp'yuternyye modeli i modelirovaniye. Tsifrovyye dvoyniki izdeliy. Obshchiye polozheniya*. [Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow, 2021. 23 p.
24. Kaspersky Lab, what is a digital footprint? 2022. URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-a-digitalfootprint>
25. Anokhov I.V. [Digital shadow as a tool for industry research]. *E-Management*. 2022. Vol. 5. No. 1, pp. 80–92. (In Russ.)
26. Krylov I.A. [Modeling and visualization of the “digital shadow” of a person in enterprises]. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2021, pp. 102–111. DOI: 10.21686/2413-2829-2021-5-102-111 (In Russ.)
27. *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok PNAE G-7-002-86* [Calculation standards for the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants PNAE G-7-002-86]. Moscow, 1989. 525 p.
28. State standard 5520-79 *Prokat listovoy iz uglerodistoy, nizkolegirovannoy i legirovannoy stali dlya kotlov i sosudov, rabotayushchikh pod davleniyem. Tekhnicheskiye usloviya* [Rolled sheets of car-

bon, low-alloy and alloy steel for boilers and pressure vessels. Technical conditions]. Moscow, 1979, p. 16.

29. State standard 25859-83 *Sosudy i apparaty stal'nyye. Normy i metody rascheta na prochnost' pri malotsiklovyykh nagruzkakh* [Steel vessels and apparatus. Standards and methods for calculating strength under low-cycle loads]. Moscow, 1983, p. 36.

Информация об авторах

Краснов Максим Львович, начальник листопркатного цеха № 11, ПАО ММК, Магнитогорск, Россия; krasnov.ml@mmk.ru

Качурин Павел Леонидович, заместитель начальника листопркатного цеха № 11, ПАО ММК, Магнитогорск, Россия; kachurin.pl@mmk.ru

Вишняков Сергей Геннадьевич, начальник цеха ПРОКАТСЕРВИС 11 ООО «ОСК», ПАО ММК, Магнитогорск, Россия; vishnyakov.sg@mmk.ru

Чернявский Александр Олегович, д-р техн. наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a.o.cher@mail.ru

Васильев Виталий Альбертович, канд. техн. наук, зам. директора, НТЦ «СИГМА», Челябинск, Россия; vasilyev_va@list.ru

Савченко Юрий Иванович, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия; jura_sav@mail.ru

Ницкий Антон Юрьевич, научный сотрудник ФГБОУ ВО «ЧелГУ», Челябинск, Россия; nitskiy@list.ru

Иванов Анатолий Иванович, научный сотрудник, НТЦ «СИГМА», Челябинск, Россия; ivanovanat88@gmail.com

Information about the authors

Maxim L. Krasnov, Head of Sheet Rolling Shop No. 11, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia; krasnov.ml@mmk.ru

Pavel L. Kachurin, Deputy Head of Sheet Rolling Shop No. 11, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia; kachurin.pl@mmk.ru

Sergey G. Vishnyakov, Head of Shop (USC) No. 11, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia; vishnyakov.sg@mmk.ru

Aleksandr O. Chernjavsky, Dr. Engineer, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a.o.cher@mail.ru

Vitaly A. Vasilyev, Dr. Engineer, Deputy Directors, SIGMA Scientific Research Center, Chelyabinsk, Russia; vasilyev_va@list.ru

Yu. I. Savchenko, Ph.D. Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; jura_sav@mail.ru tel.

Anton Yu. Nitskiy, Researcher, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia; nitskiy@list.ru

Anatoly I. Ivanov, Researcher, SIGMA Scientific Research Center, Chelyabinsk, Russia; ivanovanat88@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.09.2023; принята к публикации 08.09.2023.

The article was submitted 08.09.2023; accepted for publication 08.09.2023