НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.7

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-90-97

ВЫБОР СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ГЛАВНОЙ ЛИНИИ ПРОКАТНОГО СТАНА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ С ОРЕБРЕНИЕМ

Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи. В настоящее время вопросам энергосбережения уделяется значительное внимание в связи с ограниченностью природных ресурсов и все возрастающим техногенным загрязнением окружающей среды. Абсорбционные холодильные машины отличаются от других холодильных машин возможностью использования вторичных тепловых ресурсов, таких как сбросы ТЭЦ, тепловые отходы промышленных предприятий. Они широко применяются в системах кондиционирования и теплоснабжения, отличаются экономичностью, безопасностью и малозумностью. В конструкциях данных машин в целях повышения эффективности работы, снижения металлоемкости и габаритов применяют трубы с внутренним оребрением. Изготовление труб с внутренним оребрением возможно методами резания, накатки оребрения и прокатки полос с оребрением с последующей формовкой в трубу. Наиболее эффективным для производства труб с внутренним оребрением является способ с применением прокатки оребренных полос с последующей формовкой, отличающийся высокой производительностью и качеством получаемых труб. Целью данного исследования являлись: оценка состава оборудования главной линии стана кварто 55×260×220, ее несущей способности, выбор рациональной схемы главной линии стана для прокатки полос с оребрением. **Используемые методы.** Для нахождения значений моментов от технологической нагрузки при прокатке полос с оребрением, входящих в дифференциальные уравнения, произведен расчет данного процесса прокатки с использованием конечно-элементной модели. Созданная конечно-элементная модель позволяет определять усилия и моменты прокатки на валках с учетом натяжения концов прокатываемой полосы для различных видов наносимого оребрения. Для обеих схем произведено определение динамических нагрузок на звеньях главной линии стана путем составления динамической модели и решения соответствующей системы дифференциальных уравнений. **Результаты.** В результате проведенных расчетов получены значения: коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на звеньях главного привода, коэффициентов запаса по напряжениям в теле шпиндельных устройств при действии циклических нагрузок, коэффициентов запаса по моменту на моторной муфте. **Практическая значимость.** Проведенный анализ нагруженности элементов главной линии стана кварто 55×260×220 позволил произвести оценку его оборудования с точки зрения прокатки оребренных полос, предназначенных для производства труб с внутренним оребрением, и обосновать рациональность выбора состава оборудования главной линии прокатного стана для производства такого вида труб с приводом через опорные валки.

Ключевые слова: абсорбционные холодильные машины, трубы с оребрением, главная линия прокатного стана, прокатка полос, конечно-элементное моделирование, динамика нагружения оборудования.

© Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С., 2021

Для цитирования

Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С. Выбор состава оборудования главной линии прокатного стана для производства труб с оребрением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 90–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-90-97>

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

CHOOSING THE COMPONENTS OF THE ROLLING MILL MAIN LINE FOR THE RIBBED TUBE PRODUCTION

Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Parshin V.S.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem statement. At present, considerable attention is paid to the issues of energy saving due to limited natural resources and the increasing technology-related pollution of the environment. Absorption refrigerators differ from other cooling machines by the possibility of using secondary heat resources, such as discharges from thermal power plants, thermal waste from industrial enterprises. They are widely used in air conditioning and heating systems because of their energy-saving features, high reliability and quiet working conditions. In the design of these machines, in order to increase the efficiency of their operation, reduce the metal consumption and sizes, internally ribbed tubes are used. The production of internally ribbed tubes is possible by cutting, rolling the ribbing and rolling strips with such ribbing followed by forming into a tube. The most effective method for the production of internally ribbed tubes is a method of using rolling of ribbed strips with subsequent forming, which is characterized by high productivity and quality of the finished tubes. This study was aimed at assessing the equipment composition of the main line of quarto mill 55×260×220, its bearing capacity, the selection of a reasonable layout of the main line of the mill for rolling strips with the one-side ribbing. **Methods used.** To find the values of the torque from the technological load in rolling strips with the ribbing included in the differential equations, the simulation of this rolling process was performed using a FE model. The designed model makes it possible to determine the forces and torque of rolling taking into account tension of the ends of the rolled strip for various types of the applied ribbing. Dynamic loads on the links of the main line of the mill were determined for both layouts by compiling a dynamic model and solving the corresponding system of differential equations. **Results.** The authors obtained the following values: dynamic load factors acting on the links of the main drive, safety factors for stresses in the volume of the spindle devices under cyclic loads, and safety factors for torque on the motor coupling. **Practical relevance.** The analysis of the loading on the elements of the main line of quarto mill 55×260×220 made it possible to assess the equipment from the point of view of rolling ribbed strips intended for the production of internally ribbed tubes and to substantiate the rationality of the choice of the main line components for the rolling mill driven through back-up rolls.

Keywords: absorption refrigerators, ribbed tubes, main line of the rolling mill, strip rolling, FE simulation, equipment loading dynamics.

For citation

Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Parshin V.S. Choosing the Components of the Rolling Mill Main Line for the Ribbed Tube Production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 90–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-90-97>

Введение

При изготовлении абсорбционных холодильных агрегатов с целью повышения эффективности теплопередачи применяют трубы с внутренним оребрением из углеродистых марок сталей (рис. 1) [1–6]. Технология получения таких труб включает: нанесение оребрения на полосу в линии полосового прокатного стана, установку рулона оребренной полосы на разматыватель трубоэлектросварочного агрегата (ТЭСА), последующую формовку, сварку, калибровку и порезку полученной оребренной трубы на мерные длины, отжиг в печи с защитной атмосферой [7].

Существующие ТЭСА, предназначенные для производства труб с гладкой поверхностью, позволяют получать трубы с внутренним оребрением, совмещая высокое качество с производительностью.

Рис. 1. Труба с внутренним кольцевым оребрением:
D – наружный диаметр; s – толщина стенки;
h – высота оребрения; t – шаг оребрения

Fig. 1. Internal spiral-ribbed tube: D is an outer diameter;
s is wall thickness; h is rib height; t is a rib pitch

Прокатный стан, применяемый для нанесения оребрения, также должен отвечать требованиям к качеству получаемых полос, надежности, производительности и экономичности. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса прокатки полос с односторонним поперечным оребрением, а также получение опытно-промышленной партии труб с внутренним оребрением показали, что наилучшим прототипом при создании оборудования для нанесения оребрения на полосу является стан кварто 55×260×220 ОАО АХК «ВНИИметмаш» (рис. 2).

Энергосиловые характеристики данного стана, типоразмеры прокатываемых полос, скорость прокатки удовлетворяют параметрам технологического процесса оребрения. Возможно ведение процесса прокатки как с приводом на рабочие валки, так и с приводом на опорные валки рабочей клетки стана. Стан оборудован разматывате-

лем и моталкой, позволяющими производить прокатку полосы в рулонах.

Следует заметить, что прокатка оребренных полос сопровождается появлением переменных во времени нагрузок, характер которых зависит от вида наносимого оребрения и геометрии прокатных валков.

Целью данного исследования являлись: оценка состава оборудования главной линии стана Кварто 55×260×220, ее несущей способности, выбор рациональной схемы оборудования главной линии стана для прокатки полос с оребрением. При этом рассмотрены схемы главной линии прокатного стана согласно рис. 3.

Исключение редуктора привода при достаточной мощности установленного электродвигателя позволяет повысить КПД привода, уменьшить его габариты и снизить эксплуатационные расходы.

Рис. 2. Схема главной линии стана кварто 55×260×220: 1 – электродвигатель; 2 – моторная муфта; 3 – редуктор; 4 – коренная муфта; 5 – шестеренная клеть; 6 – шпиндель; 7 – опорный валок; 8 – рабочий профилированный валок; 9 – рабочий гладкий валок; 10 – прокатываемая полоса

Fig. 2. The diagram of the main line of quarto mill 55×260×220: 1 is an electric motor; 2 is a motor coupling; 3 is a gear box; 4 is a base coupling; 5 is a pinion stand; 6 is a spindle; 7 is a back-up roll; 8 is a work shaped roll; 9 is a work smooth roll; 10 is a rolled strip

Рис. 3. Рассматриваемые схемы главной линии прокатного стана кварто: а – с приводом через рабочие валки; б – с приводом через опорные валки; 1 – электродвигатель; 2 – моторная муфта; 3 – шестеренный валок малого диаметра; 4 – шестеренный валок большого диаметра; 5 – шпиндель; 6 – рабочий гладкий валок; 7 – рабочий профилированный валок; 8 – опорный валок; 9 – прокатываемая полоса

Fig. 3. The diagrams of the main line of the quarto rolling mill under study (a is driven via work rolls; b is driven via back-up rolls; 1 is an electric motor; 2 is a motor coupling; 3 is a pinion shaft of a small diameter; 4 is a pinion shaft of a large diameter; 5 is a spindle; 6 is a work smooth roll; 7 is a work shaped roll; 8 is a back-up roll; 9 is a rolled strip)

Моделирование процесса нагружения главной линии прокатного стана кварто 55×260×220

Для определения нагрузок в главной линии прокатного стана кварто была создана 3-массовая динамическая модель главной линии стана [8–9], изображенная на **рис. 4**.

Рис. 4. Динамическая модель главной линии прокатного стана кварто

Fig. 4. The dynamic model of the main line of the quarto rolling mill

Система уравнений, описывающих динамику привода стана по каждой из веток, при этом выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2}{d\tau^2} M_{12} = \frac{M_1}{Y_1} C_{12} - C_{12} \frac{Y_1 + Y_2}{Y_1 Y_2} M_{12} + \frac{C_{12}}{Y_2} M_{23}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{d\tau^2} M_{23} = \frac{C_{23}}{Y_2} M_{12} - C_{23} \frac{Y_2 + Y_3}{Y_2 Y_3} M_{23} + \frac{C_{23}}{Y_3} M_3(\tau), \quad (2)$$

где τ – время, с; M_{ij} – моменты упругих сил на соответствующих звеньях привода машины, кН·м; C_{ij} – приведенные жесткости звеньев, кН·м/рад; Y_i – приведенные моменты инерции звеньев, кг·м²; M_1 – момент на валу электродвигателя привода, кН·м; $M_3(\tau)$ – момент от технологической нагрузки, действующей на рабочий валок стана, кН·м.

По схеме **рис. 3, а** (привод через рабочие валки) приведенные жесткости звеньев определялись по формулам

$$C_{12} = C_M; \quad (3)$$

$$C_{23} = C_{\text{шп}}, \quad (4)$$

где C_M – жесткость моторной муфты, кН·м/рад; $C_{\text{шп}}$ – жесткость шпинделя привода, кН·м/рад.

Выражения для приведенных моментов инерции:

$$Y_1 = Y_{\text{дв}}; \quad (5)$$

$$Y_2 = Y_M + 2Y_{\text{шк1}}; \quad (6)$$

$$Y_3 = Y_{\text{шп}} + Y_{\text{вр}} + \frac{Y_{\text{во}}}{U_B^2}, \quad (7)$$

где $Y_{\text{дв}}$ – момент инерции ротора двигателя, кг·м²; Y_M – момент инерции моторной муфты, кг·м²; $Y_{\text{шк1}}$ – момент инерции шестеренного вала малого диаметра, кг·м²; $Y_{\text{шп}}$ – момент инерции шпинделя, кг·м²; $Y_{\text{вр}}$ – момент инерции рабочего вала, кг·м²; $Y_{\text{во}}$ – момент инерции опорного вала, кг·м²; U_B – передаточное отношение пары «рабочий валок – опорный валок».

По схеме **рис. 3, б** (привод через опорные валки) приведенные жесткости звеньев определялись по формулам

$$C_{12} = C_M; \quad (8)$$

$$C_{23} = \frac{C_{\text{шп}}}{U_{\text{шк}}^2}, \quad (9)$$

где $U_{\text{шк}}$ – передаточное число зубчатого зацепления шестеренной клетки.

Выражения для приведенных моментов инерции:

$$Y_1 = Y_{\text{дв}}; \quad (10)$$

$$Y_2 = Y_M + 2Y_{\text{шк1}} + \frac{2Y_{\text{шк2}}}{U_{\text{шк}}^2}; \quad (11)$$

$$Y_3 = \frac{Y_{\text{шп}} + Y_{\text{во}} + Y_{\text{вр}} U_B^2}{U_{\text{шк}}^2}, \quad (12)$$

где $Y_{\text{шк2}}$ – момент инерции шестеренного вала большого диаметра, кг·м².

Моменты от технологической нагрузки задавались функцией вида

$$M_3(\tau) = k_1 \sin(k_2 \tau + k_3) + k_4, \quad (13)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты, определяющие характер кривой нагружения.

Коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 определялись путем нахождения значений моментов, действующих на валки прокатного стана при прокатке полос с односторонним поперечным трапецидальным оребрением с шагом профиля $t = 1,26$ мм из стали 10, толщиной $h = 1,5$ мм, шириной $b = 70$ мм, при показателе трения по Зибелю $\psi = 0,25$, величине обжатия полосы $\varepsilon = 5...20\%$ с применением программного комплекса DEFORM-3D [10–11], базирующегося на методе конечных элементов (**рис. 5**). Рассматриваемый диапазон обжатий позволяет получать полосы с оребрением высотой $\Delta h = 0,04...0,2$ мм.

В результате решения системы уравнений, описывающих динамику привода стана, определены значения коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на звенья главного привода, с использованием следующего выражения:

$$k_d = \frac{M_{\text{дин}}}{M_3}, \quad (14)$$

где $M_{\text{дин}}$ – значение динамической нагрузки, кН·м; M_3 – приведенное значение момента от технологической нагрузки на звене, кН·м.

Рис. 5. Моделирование процесса прокатки полосы с ребрением

Fig. 5. Simulation of the rolling process of the ribbed strip

Расчитывались также значения коэффициентов запаса по напряжениям в теле шпинделя при расчете на усталостную прочность и коэффициенты запаса по моменту на моторной муфте с учетом коэффициента режима работы.

Результаты расчетов приведены на рис. 6–11. На рис. 6, 7 показаны примеры результатов расчета по определению значений динамической нагрузки на звеньях главного привода прокатного стана, а на рис. 8–11 приведены зависимости коэффициентов динамичности нагрузок на звеньях и коэффициентов запаса от величины обжатия полосы.

Рис. 6. Значение динамической нагрузки и приведенного момента от технологической нагрузки на шпиндельных устройствах в начальный момент времени прокатки при обжатии полосы 20% (привод через рабочие валки)

Fig. 6. Dynamic loading and reduced torque from process load on spindle assemblies at initial time of rolling with the strip rolled by 20% (driven via work rolls)

Рис. 7. Значение динамической нагрузки и приведенного момента от технологической нагрузки на моторной муфте в начальный момент времени прокатки при обжатии полосы 20% (привод через рабочие валки)

Fig. 7. Dynamic loading and reduced torque from process load on the motor coupling at initial time of rolling with the strip rolled by 20% (driven via work rolls)

Рис. 8. Зависимости коэффициента динамичности нагрузок, действующих на звенья главного привода при схеме привода через рабочие валки, от относительного обжатия полосы

Fig. 8. The “dynamic factor – percentage reduction” curve derived from the loads on the main drive links, when driven via work rolls

Рис. 9. Зависимости коэффициентов запаса для звеньев главного привода при схеме привода через рабочие валки от относительного обжатия полосы

Fig. 9. The “safety factor – percentage reduction” curve for the main drive links, when driven via work rolls

Рис. 10. Зависимости коэффициента динамичности нагрузок, действующих на звенья главного привода при схеме привода через опорные валки, от относительного обжатия полосы

Fig. 10. The “dynamic factor – percentage reduction” curve derived from the loads on the main drive links, when driven via back-up rolls

Рис. 11. Зависимости коэффициентов запаса для звеньев главного привода при схеме привода через опорные валки от относительного обжатия полосы

Fig. 11. The “safety factor – percentage reduction” curve for the main drive links, when driven via back-up rolls

Анализ полученных результатов

Как видно из полученных графиков, значения коэффициентов динамичности нагрузки на моторной муфте и шпиндельных устройствах стана увеличиваются при увеличении обжатия полосы. Наибольшие значения коэффициентов динамич-

ности нагрузки наблюдаются на шпиндельных устройствах стана. Диапазон изменения коэффициентов при этом составляет $k_d = 1,27\text{--}1,81$. Коэффициенты запаса по напряжениям в теле шпинделя и по моменту на моторной муфте имеют тенденцию к снижению при увеличении обжатия полосы. Минимальное значение коэффициента запаса по напряжениям в теле шпиндельных устройств составляет $n_{шп} = 1,86$ при рассмотрении схемы привода через рабочие валки и находится в диапазоне допускаемых величин ($[n] = 1,5\text{--}2,5$) [12–13]. При рассмотрении схемы привода через опорные валки минимальное значение коэффициента запаса по напряжениям в теле шпиндельных устройств в рассматриваемом диапазоне обжатия полосы $\varepsilon = 5\text{--}20\%$ составляет $n_{шп} = 2,75$. Минимальные значения коэффициентов запаса по моменту на моторной муфте составляют при этом $n_{мр} = 3,16$ и $n_{мо} = 1,72$ соответственно (при $[n] = 1$). Таким образом, более благоприятной с точки зрения нагрузок выглядит схема привода рабочих валков стана через опорные.

Следует также заметить, что особенностью процесса прокатки полос с оребрением является повышенный износ оребрения профилированного рабочего валка и, как следствие, необходимость более частой перевалки. В случае схемы привода через рабочие валки процесс их перевалки осложняется необходимостью производить работы, связанные с отсоединением и присоединением шпиндельных устройств. Перевалка рабочих валков на станах с приводом рабочих валков через опорные таких проблем не имеет. Процесс перевалки в этом случае выглядит проще и занимает меньшее время [14]. Кроме того, на станах с приводом рабочих валков через опорные легче обеспечить несущую способность элементов главной линии стана при создании новых конструкций, а также возможно использование рабочих валков малого диаметра, что снижает энергосиловые параметры процесса прокатки.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что наиболее рациональной для прокатки полос с оребрением является безредукторная схема главной линии стана кварто 55×260×220 с приводом рабочих валков через опорные.

Заключение

Рассмотрены безредукторные схемы главной линии полосового прокатного стана кварто 55×260×220 с приводом через рабочие и опорные валки. Определены значения моментов от техно-

логической нагрузки при прокатке полос с оребрением путем моделирования данного процесса с использованием метода конечных элементов. Произведено решение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику нагружения главной линии прокатного стана при прокатке полос с оребрением. Проведенный анализ нагруженности элементов главной линии стана кварто 55×260×220 позволил произвести оценку его оборудования с точки зрения прокатки оребренных полос, предназначенных для производства труб с внутренним оребрением и обосновать рациональность выбора состава оборудования главной линии прокатного стана для производства такого вида труб с приводом через опорные валки.

Список литературы

1. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 448 с.
2. Повышение эффективности теплообменных труб энергетических установок / В.В. Олимпиев, Б.Г. Мирзоев, И.А. Попов и др. // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. №3. С. 608–618.
3. Выбор рациональных интенсификаторов теплообмена в теплообменном оборудовании / С.А. Бурцев, Ю.А. Виноградов, Н.А. Кисилев, М.М. Стронгин // Наука и образование. 2016. №12. С. 35–56.
4. Мирмов Н.И., Мирмов И.Н. Абсорбционные холодильные машины для получения отрицательных температур охлаждения // Труды БГТУ. 2017. Сер. 1. №2. С. 328–341.
5. Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning / A.N.Skrypnik, A.V.Shchelchikov, I.A.Popov et al. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91. No.1. P. 52–63.
6. Promthaisong Pitak, Boonloi Fmnnart, Jedsadaratanachai Withada. Numerical investigation on turbulent forced convection and heat transfer characteristic in spirally semicircle-grove tube // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 9–11.
7. Разработка технологии и оборудования для изготовления труб с внутренним оребрением / В.С. Паршин, И.И. Некрасов, А.П. Карамышев, С.М. Газман // Сталь. 1994. №4. С. 51–53.
8. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. 160 с.
9. Иванченко Ф.К. Динамика и прочность прокатного оборудования / Ф.К. Иванченко, П.И. Полухин, М.А. Тылкин, В.П. Полухин. М.: Металлургия, 1970. 487 с.
10. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM: учебное пособие / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.А. Пугин, А.А. Федулов. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2010. 266 с.
11. Моделирование процессов ОМД в программном комплексе Deform: методические указания / А.В. Сотов, В.Г. Смелов, А.В. Агаповичев, Р.Д. Карташов. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. 47 с.
12. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 496 с.
13. Плотноков П.Н., Недошивина Т.А. Детали машин: расчет и конструирование: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во урал. ун-та, 2016. 236 с.
14. Пат. 2497615 Российская Федерация, МПК В21В 31/02. Опорный узел рабочих валков прокатной клетки КВАРТО / С.В. Паршин, А.А. Федулов, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ООО «НТП «РадиалПро». №2011144035/02. заявл. 31.10.2011, опубл. 10.11.2013.

References

1. Kutepov A.M., Sterman L.S., Styushin N.G. *Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Hydrodynamics and heat exchange during steam formation: a teaching aid for higher technical education institutions]. Moscow: Higher school, 1986, 448 p. (In Russ.)
2. Oлимпиев V.V., Mirzoev B.G., Popov I.A. et al. Increasing efficiency of heat exchange tubes of power facilities. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [(Journal of Engineering Physics and Thermophysics)], 2019, vol. 92, no. 3, pp. 608–618. (In Russ.)
3. Burtsev S.A., Vinogradov Yu.A., Kisilev N.A., Strongin M.M. Choosing feasible heat exchange intensifiers in heat exchange equipment. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and education: scientific publication], 2016, no. 12, pp. 35–56. (In Russ.)
4. Mirmov N.I., Mirmov I.N. Absorption refrigerators used to generate negative cooling temperatures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, series 1, no. 2, pp. 328–341. (In Russ.)
5. Skrypnik A.N., Shchelchikov A.V., Popov I.A. et al. Thermohydraulic efficiency of tubes with internal spiral finning. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 1, pp. 52–63.
6. Promthaisong Pitak, Boonloi Fmnnart, Jedsadaratanachai Withada. Numerical investigation on turbulent forced convection and heat transfer characteristic in spirally semicircle-grove tube. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 9–11.
7. Parshin V.S., Nekrasov I.I., Karamyshev A.P., Gazman S.M. Developing the technology and equipment to produce internally ribbed tubes. *Stal* [Steel], 1994, no. 4, pp. 51–53. (In Russ.)
8. Kozhevnikov S.N. *Dinamika mashin s uprugimi zven'yami* [Dynamics of machines with elastic linkage]. Kiev: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic. 1960, 160 p. (In Russ.)

9. Ivanchenko F.K., Polukhin P.I., Tylkin M.A., Polukhin V.P. *Dinamika i prochnost prokatnogo oborudovaniya* [Dynamics and strength of rolling equipment]. Moscow: Metallurgy, 1970, 487 p. (In Russ.)
10. Parshin V.S., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Pugin A.A., Fedulov A.A. *Prakticheskoe rukovodstvo k programnomu kompleksu DEFORM: uchebnoe posobie* [Practical guide on DEFORM: a teaching aid]. Yekaterinburg, Publishing House of Ural Federal University, 2010, 266 p. (In Russ.)
11. Sotov A.V., Smelov V.G., Agapovichev A.V., Kartashov R.D. *Modelirovanie protsessov OMD v programnom komplekse Deform: metodicheskie ukazaniya* [Simulation of metal forming processes using Deform: methodology instructions]. Samara: Publishing House of Samara University, 2017, 47 p. (In Russ.)
12. Dunaev P.F., Lelikov O.P. *Konstruirovaniye uzlov i detaley mashin* [Design of machine assemblies and parts]. Moscow: Academy Publishing Center, 2008, 496 p. (In Russ.)
13. Plotnikov P.N., Nedoshivina T.A. *Detali mashin: raschet i konstruirovaniye: uchebnoe posobie* [Calculation and design of machine parts: a teaching aid]. Yekaterinburg: Publishing House of Ural University, 2016, 236 p. (In Russ.)
14. Parshin S.V., Fedulov A.A., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Pugin A.I. *Opornyy uzel rabochikh valkov prokatnoy kleti KVARTO* [Mounting assembly of work rolls of the QUARTO mill stand]. Patent RF, no. 2497615, 2013.

Поступила 02.03.2021; принята к публикации 09.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 02/03/2021; revised 09/04/2021; published 28/06/2021

Некрасов Игорь Иванович – доцент, кандидат технических наук,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия.
Email: nekrasovii@yandex.ru

Федулов Артем Анатольевич – доцент, кандидат технических наук,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия.
Email: artem.feduloff@yandex.ru

Паршин Владимир Сергеевич – профессор, доктор технических наук,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия

Igor I. Nekrasov – Associate Professor, PhD (Eng.),
Ural Federal University, Russia. Email: nekrasovii@yandex.ru

Artem A. Fedulov – Associate Professor, PhD (Eng.),
Ural Federal University, Russia. Email: artem.feduloff@yandex.ru

Vladimir S. Parshin – Professor, DrSc (Eng.),
Ural Federal University, Russia