

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-105-111



ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИИ РЫЧАГОВ РАДИАЛЬНО-КОВОЧНОЙ МАШИНЫ

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

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

Аннотация. Постановка задачи. В процессе работы узлы и элементы ковочных машин различного назначения подвергаются воздействию переменных во времени нагрузок, что связано с характером взаимодействия инструмента с обрабатываемым металлом. Динамические расчеты конструкций ковочных машин позволяют оценить характер и величину этих нагрузок, проводить расчет деталей машин на выносливость путем определения коэффициентов запаса по действующим в них напряжениям. В случае получения малых расчетных значений коэффициентов запаса появляется необходимость в корректировке либо технологического режима обработки металла, либо, что производится чаще, в изменении конструкции ковочной машины. Путем изменения геометрии, масс деталей и т.п. в ряде случаев удается снизить нагруженность узлов ковочной машины и тем самым повысить безотказность и долговечность ее работы, снизить металлоемкость оборудования. Поэтому тема данной статьи, заключающаяся в поиске рациональных геометрических параметров рычагов рычажной радиально-ковочной машины, является актуальной. **Используемые методы.** Для нахождения значений моментов от технологической нагрузки, действующей при ковке на рычаги радиально-ковочной машины с закрепленными на них бойками, решалась задача по определению силыковки прутков с использованием метода совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности металла в очаге деформации. Затем было произведено построение динамической модели привода, составлена система дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода рычажной РКМ по каждой из веток, осуществлено решение. **Результаты.** Результаты решения использованы для нахождения коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на рычаги радиально-ковочной машины, и коэффициентов запаса по напряжениям, действующим в теле каждого из рычагов при различных значениях их геометрических параметров. **Практическая значимость.** Проведенные в представленной работе исследования позволили определить рациональные геометрические параметры рычагов радиально-ковочной машины. Использование данных параметров на практике позволит снизить действующие на рычаги динамические нагрузки, увеличить их стойкость и уменьшить металлоемкость конструкции.

Ключевые слова: радиальная ковка, радиально-ковочная машина, динамика привода, коэффициент динамичности, коэффициент запаса прочности.

© Некрасов И.И., Паршин В.С., Федулов А.А., 2022

Для цитирования

Некрасов И.И., Паршин В.С., Федулов А.А. Выбор рациональных параметров геометрии рычагов радиально-ковочной машины // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 105–111. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-105-111>



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

CHOOSING RATIONAL GEOMETRY PARAMETERS OF LEVERS FOR A RADIAL FORGING MACHINE

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

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement. During operation, the components and elements of forging machines for various purposes are exposed to time-varying loads, which is associated with the nature of the interaction of the tool with the processed metal. Dynamic calculations of forging machine designs allow us to assess the nature and magnitude of these loads, to calculate the machine parts for fatigue strength by determining the reserve coefficients for the acting stresses. In case of obtaining low calculated values of the reserve coefficients, there is a need to adjust either the technological mode of metal processing or, which is more often, to change the design of the forging machine. By changing the geometry, weight of parts, etc. in some cases, it is possible to reduce the load of the forging machine components and thereby increase reliability and durability of its operation, reduce the metal consumption of the equipment. Therefore, the topic of this paper, which consists in finding rational geometric parameters of levers of a lever radial forging machine, is relevant. **Methods Applied.** To find the values of the moments from the technological load, acting during forging on the levers of the radial forging machine with strikers fixed on them, the problem of determining the force of forging bars was solved, using a method of joint solution of approximate equations of equilibrium and ductility of metal in the deformation center. Then the authors developed a dynamic model of the drive, compiled a system of differential equations, describing dynamics of the lever radial forging machine drive for each of the branches, and implemented the solution. **Results.** The results of the solution are used to find the dynamic coefficients of the loads, acting on the levers of the radial forging machine, and the reserve coefficients for the stresses, acting in the body of each of the levers at different values of their geometric parameters. **Practical Relevance.** The studies carried out and described in the presented paper made it possible to determine the rational geometric parameters of the levers of the radial forging machine. The use of these parameters in practice will reduce the dynamic loads, acting on the levers, increase their durability and reduce the metal consumption of the structure.

Keywords: radial forging, radial forging machine, drive dynamics, dynamic coefficient, reserve coefficient.

For citation

Nekrasov I.I., Parshin V.S., Fedulov A.A. Choosing Rational Geometry Parameters of Levers for a Radial Forging Machine. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 105–111. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-105-111>

Введение

Радиально-ковочные машины (РКМ) рычажного типа применяются для подготовки переднего конца труб к волочению,ковки прутков и труб с целью получения высоких физико-механических свойств металла [1–3]. РКМ рычажного типа относятся к радиально-обжимным машинам и имеют ряд конструктивных преимуществ в сравнении с другими ротационно- и радиально-обжимными машинами, предназначенными для обработки полых и сплошных заготовок в холодном и горячем состоянии [4–6]. Радиально-ковочная машина рычажного типа включает в свой состав: электродвигатель привода 1, ременную передачу 2, шпиндель с экс-

центриковыми участками 3, подшипники 4, рычаги 5 с бойками 6, совершающие качательное движение относительно оси закрепления (рис. 1). В процессе работы узлы машины испытывают динамические нагрузки, учет которых необходим при проведении прочностных расчетов. Наибольшему нагружению при этом подвергаются рычаги РКМ.

Целью данного исследования являлось построение математической модели определения рациональных параметров геометрии рычагов радиально-ковочной машины рычажного типа, обеспечивающих максимальное снижение действующих на них динамических нагрузок и увеличение их стойкости, проведение решения на примере радиально-ковочной машины РКМ-45.

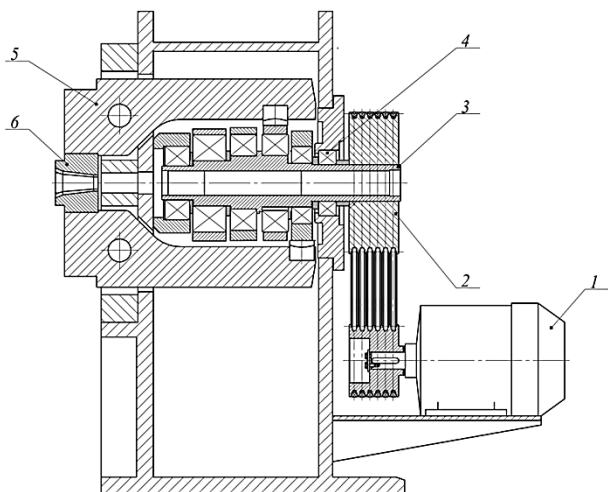


Рис. 1. Четырехбойковая рычажная радиально-ковочная машина
Fig. 1. Four-die lever radial forging machine

Моделирование процесса нагружения элементов привода радиально-ковочной машины

Для нахождения динамических нагрузок в элементах привода радиально-ковочной машины была создана приведенная модель [7–9], представленная в виде многомассовой системы с четырьмя ветками (рис. 2).

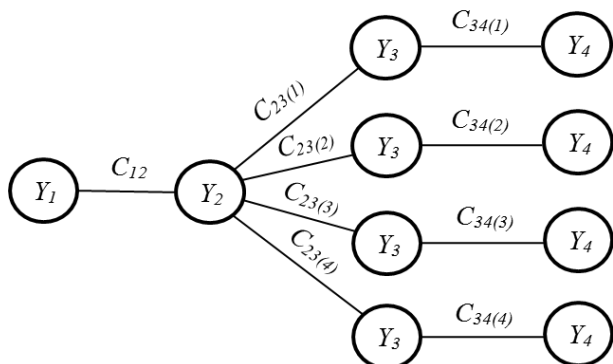


Рис. 2. Динамическая модель привода рычажной радиально-ковочной машины
Fig. 2. Dynamic model of the lever radial forging machine drive

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода рычажной РКМ по каждой из веток, выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2}{dt^2} M_{12} = \frac{M_1}{Y_1} C_{12} - C_{12} \frac{Y_1 + Y_2}{Y_1 Y_2} M_{12} + \frac{C_{12}}{Y_2} M_{23},$$

$$\frac{d^2}{dt^2} M_{23} = \frac{C_{23}}{Y_2} M_{12} - C_{23} \frac{Y_2 + Y_3}{Y_2 Y_3} M_{23} + \frac{C_{23}}{Y_3} M_{34}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} M_{34} = \frac{M_4(\tau)}{Y_4} C_{34} - C_{34} \frac{Y_3 + Y_4}{Y_3 Y_4} M_{34} + \frac{C_{34}}{Y_3} M_{23},$$

где τ – время, с; M_{12} – момент упругих сил в ременной передаче привода машины, кН·м; M_{23} – момент упругих сил на шпинделе РКМ, кН·м; M_{34} – момент упругих сил на рычаге машины, кН·м; M_1 – момент на валу электродвигателя привода, кН·м; $M_4(\tau)$ – момент от технологической нагрузки, действующей на рычаг машины, кН·м; Y_1 – момент инерции ротора двигателя со шкивом меньшего диаметра ременной передачи, кг·м²; Y_2 – момент инерции шпинделя со шкивом большего диаметра ременной передачи, кг·м²; Y_3 – момент инерции рычага РКМ относительно оси вращения, кг·м²; C_{12} – жесткость ременной передачи привода, кН·м/рад; C_{23} – жесткость вала шпинделя РКМ по рассматриваемой ветке, кН·м/рад; C_{34} – жесткость рычага РКМ по рассматриваемой ветке, кН·м/рад.

Момент от технологической нагрузки задавался функцией вида

$$M_4(\tau) = \tan^{-1}(k_1 \tau) (\sin(k_2 \tau) + 1) k_3,$$

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

Коэффициенты k_1, k_2, k_3 находились путем решения задачи по определению сил и моментов, действующих на рычаги радиально-ковочной машины РКМ-45 при ковке прутков, с использованием метода совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности металла в очаге деформации при ковке.

Жесткости рычагов и их моменты инерции определялись по выражениям

$$C_{34} = \frac{bE}{\frac{2k(1+\mu)}{a_1(h_1+h_2)} + 4 \left[\frac{a_1}{(h_1+h_2)^3} + \frac{l_1}{(h_1+h_3)^3} \right]} \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

$$Y_4 = \frac{b\rho}{3} \left[a_2^3 (h_1+h_2) + l_2^3 (h_1+h_3) + a_2 (h_1^3+h_2^3) + l_2 (h_1^3+h_3^3) \right] \cdot 10^{-12}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала рычага, Мпа; k – коэффициент формы поперечного сечения; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала рычага, кг/м³; b – ширина сечения рычага, мм; $a_1, a_2, l_1, l_2, h_1, h_2, h_3$ – геометрические параметры, мм (рис. 3).

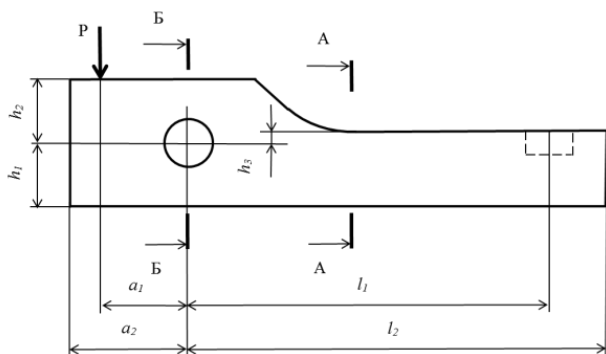


Рис. 3. Рычаг РКМ-45 (расчетная схема)
Fig. 3. The radial forging machine RKM-45 lever (design scheme)

Жесткости рычагов и их моменты инерции определяют частоты собственных колебаний рычагов РКМ. Изменение частот собственных колебаний рычагов в нужном направлении (от резонансной зоны) при неизменной частоте вынуждающей силы позволяет снизить динамические нагрузки, действующие на них. Как видно из выражений (1), (2), наибольшее влияние на жесткости рычагов и их моменты инерции оказывают размеры высоты и длины участков согласно рис. 3.

Поэтому переменными параметрами при исследовании являлись величины: длина рычагов l_1 и l_2 ; высота сечения рычагов h_1+h_2 и h_1+h_3 (существующие параметры: $l_{1(1)}=293$ мм; $l_{1(2)}=404$ мм; $l_{1(3)}=508$ мм; $l_{1(4)}=595$ мм; $l_{2(1)}=l_{2(2)}=l_{2(3)}=l_{2(4)}=640$ мм; $h_1+h_2=250$ мм; $h_1+h_3=132$ мм).

В результате решения составленной системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода РКМ, были получены значения моментов упругих сил, действующих на каждом из рычагов машины.

В качестве примера на рис. 4 и 5 приведены отдельные результаты расчетов по определению моментов упругих сил для рычага №2 РКМ.

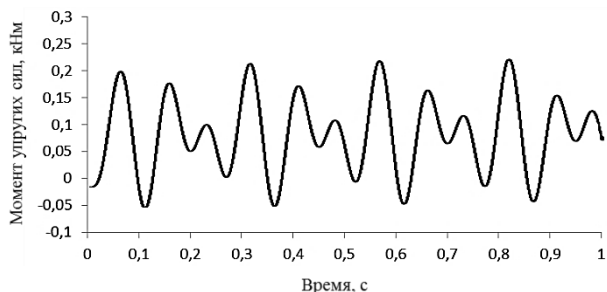


Рис. 4. Зависимость момента упругих сил от времени на рычаге №2 при $l_{1(2)}=404$ мм и $h_1+h_3=132$ мм
Fig. 4. Dependence between moment of elastic forces and time on lever no. 2 at $l_{1(2)}=404$ mm and $h_1+h_3=132$ mm

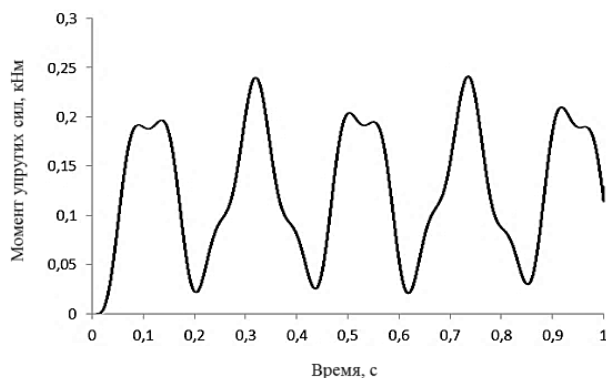


Рис. 5. Зависимость момента упругих сил от времени на рычаге №2 при $l_{1(2)}=504$ мм и $h_1+h_3=112$ мм
Fig. 5. Dependence between moment of elastic forces and time on lever no. 2 at $l_{1(2)}=504$ mm and $h_1+h_3=112$ mm

При известных значениях моментов упругих сил было произведено определение значений коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на рычаги РКМ-45, и расчет рычагов РКМ на усталостную прочность путем нахождения коэффициентов запаса прочности в опасных сечениях для случаев изменения высоты сечения рычагов -20, +0, +20 мм от существующего размера и изменения длины рычагов +0, +50, +100 мм от существующего размера, которые сведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Значения коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на рычаги РКМ-45
Table 1. Values of dynamic load coefficients, acting on the radial forging machine RKM-45 levers

Номер рычага	Изменение высоты сечения рычага, мм	Изменение длины рычага, мм		
		+0	+50	+100
Рычаг №1	-20	1,18	1,02	0,98
	+0	1,75	1,18	1,02
	+20	3,37	1,55	1,13
Рычаг №2	-20	1,05	0,99	0,97
	+0	1,24	1,05	0,99
	+20	1,67	1,18	1,05
Рычаг №3	-20	1,0	0,96	0,95
	+0	1,14	0,98	0,96
	+20	1,23	1,09	0,99
Рычаг №4	-20	0,98	0,95	0,93
	+0	1,05	0,98	0,96
	+20	1,15	1,01	0,97

Таблица 2. Значения коэффициентов запаса прочности для рычагов РКМ-45 (величина без скобок – сечение А-А; величина в скобках – сечение Б-Б (см. рис. 3)

Table 2. Values of reserve coefficients for the radial forging machine RKM-45 levers (the value without brackets is section A-A; the value in brackets is section Б-Б (see Fig. 3)

Номер рычага	Изменение высоты сечения рычага, мм	Изменение длины рычага, мм		
		+0	+50	+100
Рычаг №1	-20	3,51 (2,87)	3,53 (3,54)	3,54 (3,97)
	+0	2,70 (1,88)	4,15 (3,47)	4,53 (4,34)
	+20	1,63 (1,01)	4,26 (3,19)	5,05 (4,41)
Рычаг №2	-20	3,16 (3,59)	3,17 (3,92)	3,18 (4,07)
	+0	3,12 (3,08)	3,94 (4,43)	4,12 (4,69)
	+20	2,88 (2,51)	4,32 (4,55)	5,00 (5,14)
Рычаг №3	-20	2,96 (3,92)	2,97 (4,03)	2,98 (4,11)
	+0	3,22 (3,68)	3,75 (4,41)	3,87 (4,82)
	+20	3,61 (3,63)	4,59 (4,76)	4,90 (5,67)
Рычаг №4	-20	2,85 (3,97)	2,86 (4,08)	2,86 (4,14)
	+0	3,44 (4,18)	3,69 (4,61)	3,75 (4,93)
	+20	3,92 (4,25)	4,63 (5,30)	4,82 (6,04)

Значения коэффициентов динамичности нагрузок при этом находились по формуле [10]

$$k_d = \frac{M_y}{M_T},$$

где M_y – максимальное значение момента упругих сил, кН·м; M_T – максимальное значение момента от технологической нагрузки на рычаге, кН·м.

Анализ полученных результатов

Анализ полученных расчетных значений коэффициентов динамичности нагрузок и коэффициентов запаса прочности позволяет сделать следующие выводы.

При изменении высоты сечения рычагов в сторону уменьшения (-20 мм) при существующих значениях длин минимальное значение коэффициента запаса прочности [11, 12] для рычагов увели-

чивается с $n = 1,88$ (рычаг №1, сечение Б-Б) до $n = 2,85$ (рычаг №4, сечение А-А), что связано со снижением частоты собственных колебаний рычагов и динамических нагрузок, действующих на них. При изменении высоты сечения рычагов в сторону увеличения (+20 мм) при существующих значениях длин минимальное значение коэффициента запаса прочности уменьшается с $n = 1,88$ (рычаг №1, сечение Б-Б) до $n = 1,01$ (рычаг №1, сечение Б-Б), что связано с увеличением частоты собственных колебаний рычагов и динамических нагрузок, действующих на них. Изменение длин рычагов на +50 и +100 мм при существующем значении высоты ведет к снижению частоты собственных колебаний и динамических нагрузок. Минимальное значение коэффициента запаса прочности при этом увеличивается с $n = 1,88$ (рычаг №1, сечение Б-Б) до $n = 3,47$ (рычаг №1, сечение Б-Б) при +50 мм изменения длины и $n = 3,75$ (рычаг №4, сечение А-А) при +100 мм изменения длины. При комбинации изменения высоты сечения рычагов и их длины при уменьшении высоты на -20 мм и увеличении длины при +50 и +100 мм получаем увеличение минимального значения коэффициента запаса прочности до величины $n = 2,86$ (рычаг №4, сечение А-А). А при комбинации изменения высоты сечения рычагов и их длины при увеличении высоты на +20 мм получаем: при +50 мм длины – минимальное значение коэффициента запаса прочности $n = 3,19$ (рычаг №1, сечение Б-Б); при +100 мм длины – $n = 4,41$ (рычаг №1, сечение Б-Б). Таким образом, с точки зрения металлоемкости, габаритов рычагов и их стойкости к нагрузкам наиболее рациональным является уменьшение высоты сечения рычагов (-20 мм) с сохранением длины существующих конструкций. При этом на 13,2% уменьшается масса рычагов и в 1,52 раза повышается их стойкость к нагрузкам.

Заключение

Рассмотрение задачи по определению значений коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на рычаги радиально-ковочной машины рычажного типа, и их расчет на усталостную прочность с использованием составленной динамической модели привода машины и нахождения решения соответствующей ей системы дифференциальных уравнений позволяет определять рациональные геометрические параметры рычагов РКМ. Применение данных параметров на практике позволяет снизить действующие на рычаги РКМ динамические нагрузки, увеличить их стойкость и уменьшить металлоемкость конструкции.

Список литературы

1. Подготовка концов труб перед волочением на радиально-ковочной машине AVS / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин, В.А. Сыстеров // *Металлург*. 2008. №9. С. 40–41.
2. Исследование деформационного упрочнения и поврежденности заготовок из тяжелых сплавов на основе вольфрама / Карамышев А.П., Некрасов И.И., Паршин В.С., Федулов А.А., Нестеренко А.В., Смирнов С.В., Швейкин В.П., Вичужанин Д.И. // *Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ-16): тр. междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 1*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С.148–153.
3. Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С. Определение неоднородности деформации при ковке прутков на рычажной радиально-ковочной машине // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2020. № 3. С.115–118.
4. Радюченко Ю.С. Ротационное обжатие. М.: Машиностроение, 1972. 176 с.
5. Закарлюкин С.И., Коваль Г.И. Получение труб горячим редуцированием на радиально-ковочной машине SSK-14 // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. №2. С. 242–246.
6. Jianglin Huang, Carl D. Slater, Anap Mandral, Paul Blackwell. A Dynamic Model for Simulation of Hot Radial Forging Process. International conference on the Technology of the Plasticity. ICTP 2017. Cambridge. United Kingdom. 2017. С. 479–483.
7. Чалова М.Ю., Мишин А.В., Шепелина П.В. Основы динамики машин: учеб. пособие. Ч. 1. М.: РУТ (МИИТ), 2017. 81 с.
8. Вульфсон И.И. Краткий курс теории механических колебаний. М.: ВНТР, 2017. 241 с.
9. Ванин В.А., Колодин А.Н., Однолько В.Г. Расчет и исследование динамических характеристик приводов металлорежущих станков: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 120 с.
10. Динамика и прочность прокатного оборудования: учеб. пособие / Ф.К. Иванченко, П.И. Полухин, М.А. Тылкин, В.П. Полухин. М.: Металлургия, 1970. 487 с.
11. Федосьев В.И. Сопrotivление материалов: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 542 с.
12. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопrotivлению материалов. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.
2. Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Parshin V.S., Fedulov A.A., Nesterenko A.V., Smirnov S.V., Shveykin V.P., Vichuzhanin D.I. Study of strain hardening and damage of workpieces made of heavy alloys based on tungsten. *Nanotekhnologii funktsionalnykh materialov (NFM-16): tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Nanotechnologies of Functional Materials (NFM ' 16): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. In 2 volumes. Saint Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 2016, vol. 2, pp. 148–153. (In Russ.)
3. Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Parshin V.S. Determining inhomogeneity of deformation, when forging rods on a lever radial forging machine. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in mechanical engineering], 2020, no. 3, pp. 115–118. (In Russ.)
4. Radyuchenko Yu.S. *Rotatsionnoe obzhatie* [Rotary swaging]. Moscow: Mechanical Engineering, 1972, 176 p. (In Russ.)
5. Zakaryukin S.I., Koval G.I. Pipe production by hot reducing on SSK-14 radial-forging machine. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2019, vol. 75, no. 2, pp. 242–246. (In Russ.)
6. Jianglin Huang, Carl D. Slater, Anap Mandral, Paul Blackwell. A dynamic model for simulation of hot radial forging process. International Conference on the Technology of the Plasticity. ICTP 2017. Cambridge. United Kingdom, 2017, pp. 479–483.
7. Chalova M.Yu., Mishin A.V., Shepelina P.V. *Osnovy dinamiki mashin: ucheb. posobie* [Fundamentals of machine dynamics: study guide]. Part 1. Moscow: RUT (MIIT), 2017, 81 p. (In Russ.)
8. Wulfson I.I. *Kratkiy kurs teorii mekhanicheskikh kolebaniy* [A short course in the theory of mechanical vibrations]. Moscow: VNTR, 2017, 241 p. (In Russ.)
9. Vanin V.A., Kolodin A.N., Odnolko V.G. *Raschet i issledovanie dinamicheskikh kharakteristik privodov metallorezhushchikh stankov: ucheb. posobie* [Calculation and research of dynamic characteristics of drives of metal-cutting machines: study guide]. Tambov: Publishing House of TSTU, 2012, 120 p. (In Russ.)
10. Ivanchenko F.K., Polukhin P.I., Tylkin M.A., Polukhin V.P. *Dinamika i prochnost prokatnogo oborudovaniya: ucheb. posobie* [Dynamics and strength of rolling equipment: study guide]. Moscow: Metallurgy, 1970, 487 p. (In Russ.)
11. Fedosiev V. I. *Soprotivlenie materialov: uchebnik dlya vuzov* [Strength of Materials: textbook for universities]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2018, 542 p. (In Russ.)
12. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook on strength of materials]. Kiev: Nauk. dumka, 1988, 736 p. (In Russ.)

References

1. Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Parshin V.S., Systеров V.A. Preparation of pipe ends before drawing on the AVS radial forging machine. *Metallurg* [Metallurgist], 2008, no. 9, pp. 40–41. (In Russ.)

Поступила 18.01.2022; принята к публикации 15.02.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 18/01/2022; revised 15/02/2022; published 25/03/2022

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

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

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

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

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

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