

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО УСИЛИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГОФРИРОВАННЫХ ЛЕНТ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ

Ю. В. Щипкова

Омский государственный технический университет
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье представлены результаты экспериментального исследования, направленного на определение необходимой нагрузки при накатывании гофрированной ленты теплообменника для аэродинамических труб. Эксперименты проводились на горизонтально-фрезерном станке модели 6Н81. Результаты эксперимента распространяются на ленты из нержавеющей стали толщиной от 0,3 до 0,4 мм.

Ключевые слова: статическое усилие, динамическое усилие, гофрированная лента, аэродинамические трубы, накатывание, виброустановка.

Введение

Для испытания элементов конструкции летательных аппаратов необходимо создать условия, близкие к реальным. Для проведения экспериментов используются аэродинамические трубы, одним из элементов которых является теплоаккумулятор, служащий для нагрева рабочего газа до определенных температурных значений [1]. В свою очередь, основным элементом регенеративного теплоаккумулятора является свернутая в рулон гофрированная нержавеющая лента. Наличие гофр на ленте обусловлено необходимостью увеличения площади теплоотдачи.

Эффективность работы теплоаккумуляторов для аэродинамических труб во многом зависит от параметра ленты теплообменника. На данный момент существует несколько способов изготовления гофрированной ленты [2]. Самый распространенный метод изготовления гофр на ленте — штамповка. Однако данный метод отличается низкой производительностью, сложностью в изготовлении и наладке штампов. Другой метод — накатывание ленты между двумя роликами. Основным недостатком данного метода является сложность в проектировании роликов и большая вероятность возникновения упругого последствия материала (пружинения) [3]. Наиболее действенным методом изготовления таких лент можно считать накатывание, совмещенное с ударной динамической нагрузкой. Таким образом, данный метод совмещает в себе достоинства обоих методов, является эффективным, производительным и сравнительно недорогим. Для достижения поставленной задачи было изготовлено устройство, состоящее из станка горизонтально-фрезерного, устройства подачи и накатывания ленты и устройства для создания динамической силы (рис. 1). В свою очередь, устройство для подачи и накатывания ленты представлено на рис. 2, а устройство для создания динамической силы на рис. 3. Установка работает следующим образом.

Нержавеющую ленту через устройство подачи подают на пару зубчатых роликов, находящихся

в зацеплении с зазором f , равным толщине ленты. В данной схеме один накатной ролик закреплен в приспособлении и имеет свободное вращение, а второй закреплен на шпинделе станка и зафиксирован от осевого вращения шпонкой.

Статическое усилие прилагается путем подачи стола. Для наложения динамического усилия, с целью калибровки и правки ленты в процессе накатывания, на хобот станка устанавливается электродвигатель с маховиками и неуравновешенными грузами. При включении электродвигателя на хобот станка передается вибрация, которая позволяет проводить подчеканку [4] ленты с целью проработки впадин и вершин гофры и калибровки коробления ленты.

Приложение динамической нагрузки значительно увеличивает скорость деформации. Зависимость между скоростью деформации и пластическими изменениями были описаны еще в статьях [5–6].

Постановка задачи

Для определения рабочих величин изготовления гофрированной ленты предложенным в статье способом необходимо решить следующие задачи:

1. Определить статическую силу и построить тарировочный график.
2. Определить ударную нагрузку.
3. Провести анализ деформации ленты в процессе накатывания.

Определение статической силы и построение тарировочной характеристики станка

Существует несколько разных способов определения сил в станке. В статье [7] описывается метод, заключенный в использовании притиров для определения крутящего момента и усилия прижима на шпинделе станка. Однако данный способ имеет существенный недостаток — результаты экспериментов сильно отличаются в зависимости от площади контакта доводочных притиров и детали, степени изношенности притиров и условий контакта. Таким образом, результаты экспериментов не всегда дают адекватный результат.

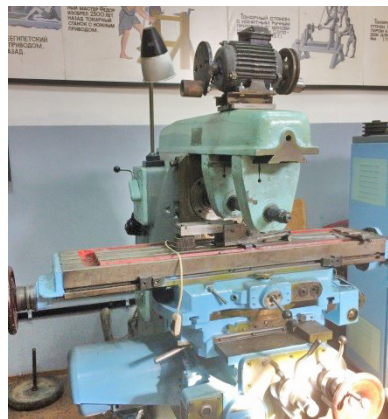
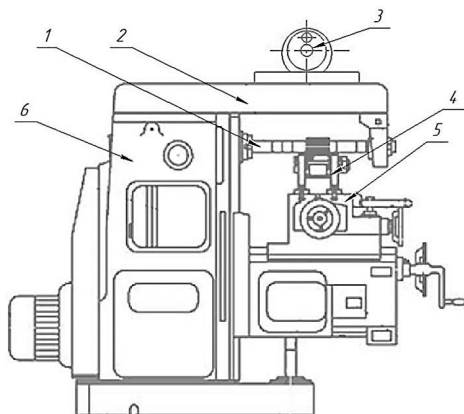


Рис. 1. Устройство для накатывания гофрированной ленты:
 1 — шпиндель; 2 — хобот; 3 — устройство для создания динамической силы;
 4 — устройство подачи и накатывания ленты; 5 — стол; 6 — станина

Fig. 1. Device for rolling a corrugated tape:
 1 — spindle; 2 — trunk; 3 — device for creating dynamic force;
 4 — device for feeding and rolling the tape; 5 — table; 6 — bed

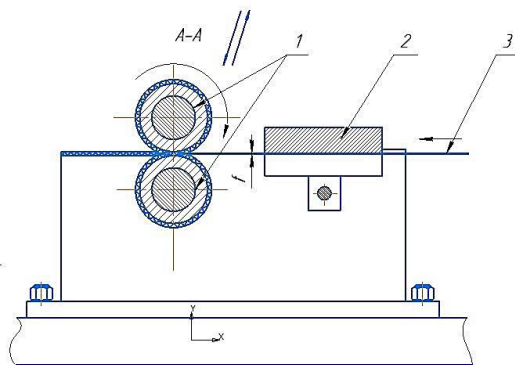


Рис. 2. Устройство для подачи и накатывания ленты:
 1 — пара зубчатых роликов; 2 — устройство подачи; 3 — стальная лента

Fig. 2. Device for feeding and rolling the tape:
 1 — a pair of toothed rollers; 2 — a feeding device; 3 — a steel belt

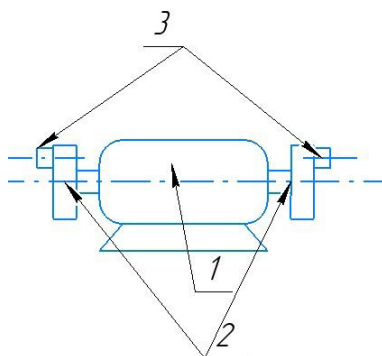


Рис. 3. Устройство для создания динамической силы:
 1 — электродвигатель; 2 — маховики; 3 — неуравновешенные грузы

Fig. 3. Device for creating dynamic force:
 1 — electric motor; 2 — flywheels; 3 — unbalanced loads

В статье [8] для определения нагрузок в станке с ЧПУ предлагается определять с помощью измерения силы тока в нагружаемом электроприводе с последующим вычислением момента. Однако данный метод легко реализуем только на станках с ЧПУ. И не подходит для универсальных фрезерных стан-

ков, на которых проводилось изготовление гофрированных лент.

При проведении эксперимента для определения радиальной нагрузки был использован динамометр ДОСМ-5. Калибровка прибора проводилась непосредственно перед началом эксперимента.

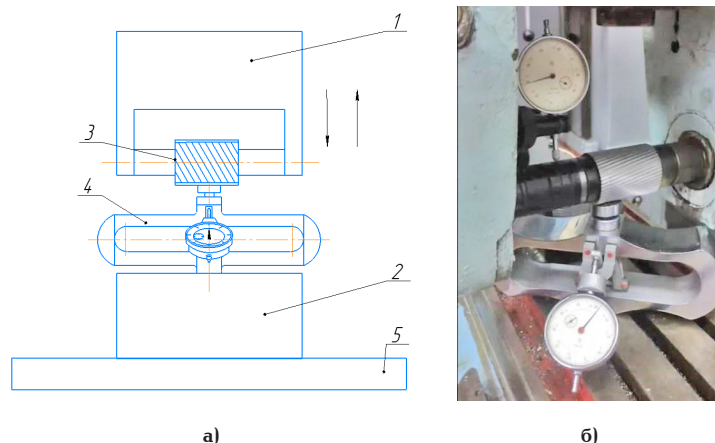


Рис. 4. Наладка для измерения сил: а) схема установки динамометра; б) проведение эксперимента; 1 — хобот станка; 2 — нижняя опора; 3 — накатной ролик; 4 — динамометр пружинный на сжатие ДОСМ-5; 5 — стол станка

Fig. 4. Adjustment for measuring forces: a) installation diagram of the dynamometer; b) conducting an experiment; 1 — the trunk of the machine; 2 — the lower support; 3 — the knurled roller; 4 — the spring dynamometer for compression DOSM-5; 5 — the machine table

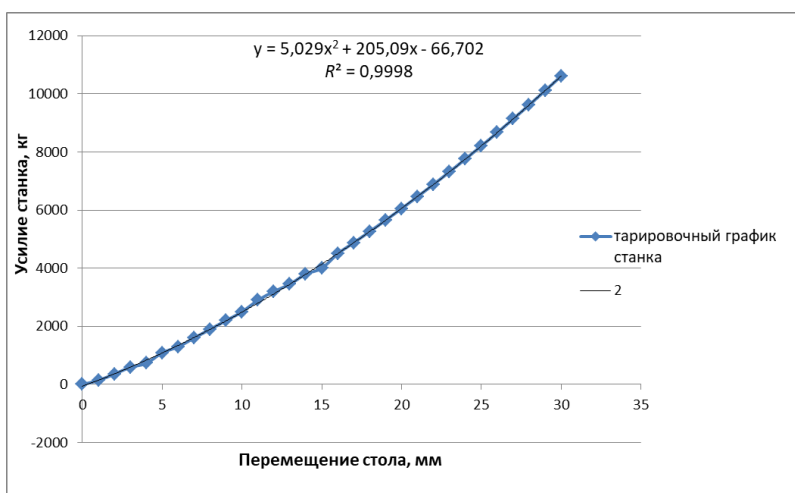


Рис. 5. Тарировочный график станка
Fig. 5. Calibration schedule of the machine

Динамометр был установлен под ось верхнего ролика (рис. 4).

Предварительный натяг устанавливается вручную, путем вертикальной подачи стола.

В статье [9] указано, что усилия, при которых происходит прокат ленты за один проход без коробления с полным формированием профиля, находятся в пределах от 30000 Н до 40000 Н.

Для используемого в экспериментах станка 6Н81, был построен тарировочный график, по которому от величины вертикальной подачи стола можно определить величину усилия в зоне контакта роликов с заготовкой (рис. 5). На графике проведена линия тренда и представлено ее уравнение. Значение аппроксимации составляет 0,9998, что можно считать практически полным совпадением с реальным графиком. Используя представленное уравнение,

можно определить, какое будет приложено усилие в станке при подаче стола на заданное расстояние.

Определение ударной нагрузки

Теоретическое определение ударной нагрузки произвести крайне сложно из-за большого количества неизвестных параметров: жесткость закрепления оправки в шпинделе как демпфирующего устройства; влияние на эту жесткость диаметра оправки, наличие втулок; условие закрепления хобота станка в направляющих, расположение виброустановки на хоботе и т.д. [10–12].

Поэтому определение ударной нагрузки проводилось экспериментально методом подбора грузов. Определение нагрузки проводилось путем определения амплитуды колебаний хобота станка

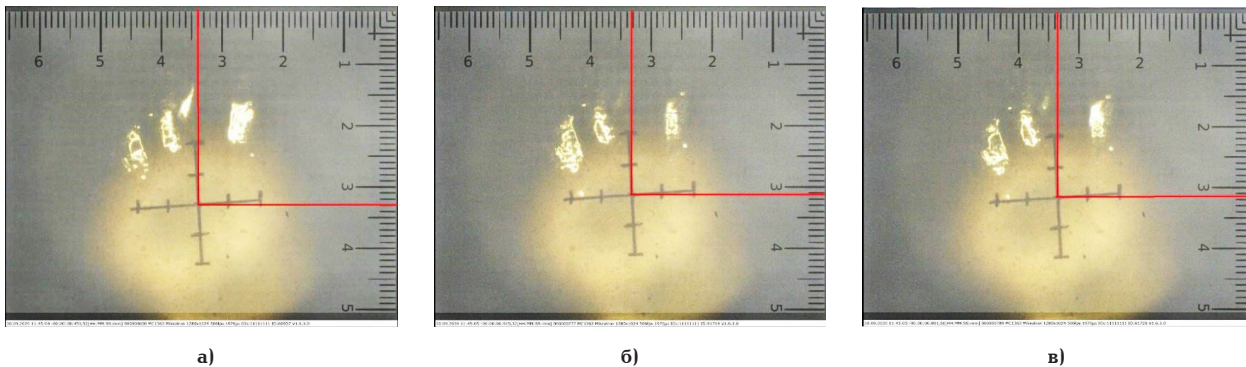


Рис. 6. Амплитуда движения хобота станка:
 а) начальное положение; б) верхнее положение; в) нижнее положение
Fig. 6. The amplitude of the machine trunk movement
 a) initial position; b) upper position; c) lower position

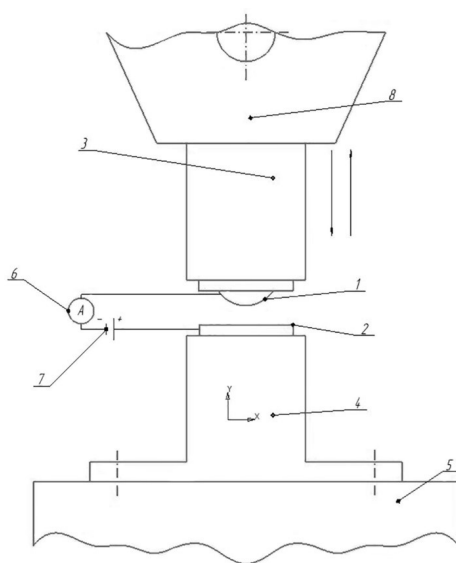


Рис. 7. Схема измерения амплитуды:
 1 — контакт; 2 — концевая мера; 3 — верхняя опора контакта;
 4 — нижняя опора контакта; 5 — стол; 6 — амперметр;
 7 — источник питания; 8 — передняя опора шпинделя
Fig. 7 The scheme of measuring the amplitude
 1 — contact; 2 — end measure; 3 — upper contact support;
 4 — lower contact support; 5 — table; 6 — ammeter;
 7 — power supply; 8 — front spindle support

с верхним роликом, которая является эквивалентом подачи стола. Величину нагрузки, в данном случае, можно определить по тарифовочному графику (рис. 5).

Для определения усилия необходимо выяснить траекторию движения хобота станка при включении устройства для создания динамического усилия. Траектория движения и амплитуда были определены при помощи высокоскоростной съемки.

На хобот станка устанавливалась метка; стол станка поднимался на расстояние, определенное для накатывания ленты, и включалась виброустановка. На рис. 6. представлены начальное, верхнее и нижнее положения хобота станка при включенной виброустановке.

При проведении эксперимента установлено, что хобот станка движется не вертикально вниз, а под

углом, таким образом нанося удары на одну сторону ленты.

Амплитуда движения траверсы составляет около 1 мм, но данный результат неточен.

Для более точного определения амплитуды был использован пьезометрический датчик, схема которого представлена на рис. 7.

Измерение проводилось следующим образом.

На переднюю опору шпинделя и стол станка устанавливались текстолитовые, плохо проводящие ток опоры. На верхнюю опору закреплялся стальной контакт, а на нижнюю опору — стальные концевые меры. К контакту и мерам через амперметр был подключен источник питания.

При включении виброустановки происходит замыкание контакта и концевой меры. Замыкание контакта регистрирует амперметр. Изначально тол-

Таблица 1. Толщина ленты после проката
Table 1. Thickness of the tape after rolling

	Лента № 1	Лента № 3	Лента № 4
Толщина впадины	0,3380	0,2810	0,3136
	0,3208	0,2893	0,3356
	0,3279	0,2894	0,3321
	0,3196	0,2921	0,3208
	0,3112	0,2854	0,3336
Ср. знач.	0,3235	0,2874	0,3271
Толщина выступа	0,3214	0,3182	0,3105
	0,2962	0,2888	0,3190
	0,2968	0,3126	0,3056
	0,2910	0,2989	0,3040
	0,3002	0,3168	0,2985
Ср. знач.	0,3012	0,3071	0,3075
Левая сторона гофра	0,2830	0,2751	0,3165
	0,2911	0,3090	0,3065
	0,2777	0,2999	0,3121
	0,3030	0,3175	0,3082
	0,2841	0,3275	0,3131
Ср. знач.	0,2878	0,3058	0,3113
Правая сторона гофра	0,3288	0,3161	0,3365
	0,3250	0,3224	0,3326
	0,3129	0,3146	0,3360
	0,3191	0,3118	0,3335
	0,3143	0,3245	0,3188
Ср. знач.	0,3200	0,3179	0,3315

щина меры выбиралась из условия замыкания контакта в состоянии покоя. В дальнейшем, при включении установки, толщина концевой меры поэтапно уменьшалась до выполнения условия минимальной толщины, необходимой для замыкания контакта при включении виброустановки.

Измерение проводилось при установлении предварительного натяга, необходимого для накатывания ленты и равного 40000 Н. В результате измерений определено, что амплитуда движения станка составляет 1,1 мм, что соответствует нагрузке в 733 кг.

Анализ деформации ленты в процессе накатывания

При прокатывании ленты с использованием предлагаемой технологии совмещения кинематической и динамической нагрузок деформация ленты происходит неравномерно. Толщина ленты изменяется в зависимости от параметров гофрирования. После проката проводились измерения толщины ленты на измерительном микроскопе VMM 300 [13]. Измерения проводились по двум точкам в системе координат ОХУ в четырех положениях: толщина впадины; толщина выступа; правая сторона гофра; левая сторона гофра.

В табл. 1 приведены результаты измерений трех образцов из нержавеющей стали Х18Н10Т толщиной 0,35 мм с разными параметрами гофрирования.

По результатам измерений выявлено, что левая сторона гофры, та, на которую приходится динами-

ческий удар, деформируется сильнее правой. Однако изменения толщины остаются в пределах допустимых толщин, определенных заказчиком.

Выводы и заключение

1. В работе предложена технология изготовления гофрированной ленты методом совмещения накатывания и штамповки, т.е. приложением статических и динамических сил.

2. Представлена методика подбора сил, необходимых для изготовления гофрированной ленты предложенным методом.

3. Определена тарировочная характеристика станка.

4. Проведен анализ величины деформации ленты в процессе изготовления.

5. Установлена суммарная величина статической и динамической нагрузок, которая составила 51000 Н, из них 7400 Н приходится на ударную составляющую.

Список источников

1. Пат. 2251057 Российская Федерация, МПК F 24 Н 7/02. Кауперный подогреватель газа / Куршин А. П., Баранов А. А. № 2003127785/06; заявл. 16.09.03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12. 4 с.

2. Щипкова Ю. В. Анализ методов изготовления стальных гофрированных лент регенеративного теплообменника // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 384–390.

3. Щипкова Ю. В., Попов А. Ю. Профилирование роликов для формообразования гофрированных профилей на нержавеющей ленте теплообменника для аэродинамических труб / Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Авиационная и ракетно-космическая техника. 2021. № 2. С. 16–27. DOI: 10.18698/0236-3941-2021-2-16-27.

4. Бобин К., Курлаев Н., Петуныкина Л. Технология изготовления деталей летательных аппаратов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 90 с. ISBN 978-5-7782-2647-0.

5. Гуляев Ю. А. Влияние скорости деформирования на процесс прямого холодного выдавливания осесимметричных деталей из легированных сталей // Кузнечно-штамповочное производство. 1984. № 10. С. 12–14.

6. Корнеев И. Н., Мороховец Г. М., Филатов Ф. И. [и др.]. Исследование технологической пластичности нержавеющей сталей // Кузнечно-штамповочное производство. 1961. № 14. С. 9–12.

7. Беляева Г. И. Определение сил на шпинделе станка при доводке плоскостей // Машиностроение: респ. межведомствен. сб. науч. тр. 2018. Вып. 31. С. 27–30.

8. Гаймалов А. Ф., Кудояров Р. Г., Башаров Р. Р. Исследование способа определения нагрузок, действующих в станке с ЧПУ // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: материалы всерос. науч. конф. 2018. С. 291–295. ISBN 978-5-4221-1093-3.

9. Щипкова Ю. В., А. Ю. Попов, Ю. А. Рогоза, Д. А. Кормаков. Определение усилий накатывания гофрированных профилей на нержавеющей ленте теплообменника для аэродинамических труб // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5. № 2. С. 106–112. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-106-112.

10. Субич В. Н. Расчет и проектирование процессов объемной и листовой штамповки. Москва: Изд-во МГИУ, 2007. 411 с. ISBN 978-5-276-01133-2.

11. Железков О. С., Галиахметов Т. Ш., Стеблянка В. Л. Определение энергосиловых параметров процесса штамповки

головки болтов с торцевой лункой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2017. Т. 15, № 2. С. 35–39. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-35-39.

12. Пат. 2183147 Российская Федерация, МПК В 21 J 5/00, G 01 L 1/00. Способ определения усилий прессы, необходимых для изготовления металлических деталей с тонким полотном, в процессе объемной штамповки / Соломонов К. Н., Костарев И. В. № 2001115606/02; заявл. 06.008.01; опубл. 10.06.02.

13. Лукьянов В. В. Разработка рациональных режимов комбинированного термомеханического воздействия при производстве облегченных изделий с заданными физико-механическими свойствами: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2019. 139 с.

ЩИПКОВА Юлия Владимировна, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология».

SPIN-код: 1233-2755

AuthorID (РИНЦ): 830012

AuthorID (SCOPUS): 57201775187

Адрес для переписки: ylia_sipkova@mail.ru

Для цитирования

Щипкова Ю. В. Определение статического и динамического усилия для изготовления гофрированных лент для теплообменников аэродинамических труб // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 91–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-91-98.

Статья поступила в редакцию 09.07.2021 г.

© Ю. В. Щипкова

DETERMINATION OF STATIC AND DYNAMIC FORCES FOR MANUFACTURE OF CORRUGATED BELTS FOR WIND TUNNEL HEAT EXCHANGERS

Yu. V. Shchipkova

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article presents the results of an experimental study aimed at determining the required load when rolling a corrugated heat exchanger belt for wind tunnels. The experiments are carried out on a horizontal milling machine model 6H81. The results of the experiment are applied to stainless steel tapes with a thickness of 0,3 to 0,4 mm.

Keywords: static force, dynamic force, corrugated tape, wind tunnels, rolling, vibration installation.

References

1. Patent 2251057 Russian Federation, IPC F 24 H 7/02. Kaupernyy podogrevatel' gaza [Hot blast gas heater] / Kurshin A. P., Baranov A. A. No. 2003127785/06. (In Russ.).
2. Shchipkova Yu. V. Analiz metodov izgotovleniya stal'nykh gofrirovannykh lent regenerativnogo teploobmennika [Analysis of manufacturing methods for steel corrugated belts of regenerative heat exchanger] // Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. *Izvestiya Tula State University Technical Sciences*. 2020. No. 5. P. 384–390. (In Russ.).
3. Shchipkova Yu. V., Popov A. Yu. Profilirovaniye rolikov dlya formoobrazovaniya gofrirovannykh profiley na lente teploobmennika dlya aerodinamicheskikh trub [Roller profiling for shaping corrugated profiles on the heat exchanger tape for wind tunnels] // Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2021. No. 2 (137). P. 16–27. DOI: 10.18698/0236-3941-2021-2-16-27. (In Russ.).
4. Bobin K., Kurlyayev N., Petun'kina L. Tekhnologiya izgotovleniya detaley letatel'nykh apparatov [Technology of manufacturing aircraft parts]. Novosibirsk, 2015. 90 p. ISBN 978-5-7782-2647-0. (In Russ.).
5. Gulyayev Yu. A. Vliyaniye skorosti deformirovaniya na protsess pryamogo kholodnogo vydavlivaniya osesimmetrichnykh detaley iz legirovannykh staley [Influence of the deformation rate on the process of direct cold extrusion of axisymmetric parts made of alloyed steels] // Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. *Kuznechno-Shtampovochnoye Proizvodstvo*. 1984. No. 10. P. 12–14. (In Russ.).
6. Korneyev I. N., Morokhovets G. M., Filatov F. I. [et al.]. Issledovaniye tekhnologicheskoy plastichnosti nerzhavyushchikh staley [Research of technological plasticity of stainless steels] // Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. *Kuznechno-Shtampovochnoye Proizvodstvo*. 1961. No. 14. P. 9–12. (In Russ.).
7. Belyayeva G. I. Opredeleniye sil na shpindele stanka pri dovodke ploskostey [Determination of forces on the spindle of the machine when finishing the planes] // Mashinostroyeniye. *Mashinostroyeniye*. 2018. Issue 31. P. 27–30. (In Russ.).
8. Gaymalov A. F., Kudoyarov R. G., Basharov R. R. Issledovaniye sposoba opredeleniya nagruzok, deystvuyushchikh v stanke s ChPU [Investigation of the method for determining the loads acting in a CNC machine] // Stankostroyeniye i innovatsionnoye mashinostroyeniye. Problemy i tochki rosta. *Stankostroyeniye i Innovatsionnoye Mashinostroyeniye. Problemy i Tochki Rosta*. 2018. P. 291–295. ISBN 978-5-4221-1093-3. (In Russ.).
9. Shchipkova Yu. V., Popov A. Yu., Rogoza Yu. A., Kormakov D. A. Opredeleniye usilyi nakatyvaniya gofrirovannykh profiley na nerzhavyushchey lente teploobmennika dlya aerodinamicheskikh trub [Determination of rolling forces of corrugated profiles on stainless belt of heat exchanger for wind tunnels] // Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 106–112. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-106-112. (In Russ.).
10. Subich V. N. Raschet i proyektirovaniye protsessov ob'yemnoy i listovoy shtampovki [Calculation and design of die forging and sheet stamping processes]. Moscow, 2007. 411 p. ISBN 978-5-276-01133-2. (In Russ.).
11. Zhelezkov O. S., Galiakhmetov T. Sh., Steblyanko V. L. Opredeleniye energosilovykh parametrov protsessa shtampovki golovok boltov s tortsevoy lunkoy [Determining the power parameters of bolt socket head forging process] // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2017. Vol. 15, no. 2. P. 35–39. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-35-39. (In Russ.).
12. Patent 2183147 Russian Federation, IPC B 21 J 5/00, G 01 L 1/00. Sposob opredeleniya usilyi pressa, neobkhodimykh dlya izgotovleniya metallicheskih detaley s tonkim polotnom, v protsesse ob'yemnoy shtampovki [Method for determining press efforts necessary for making metallic parts with thin blade by forging] / Solomonov K. N., Kostarev I. V. No. 2001115606/02/ (In Russ.).
13. Luk'yanov V. V. Razrabotka ratsional'nykh rezhimov kombinirovannogo termodeformatsionnogo vozdeystviya pri proizvodstve oblegchennykh izdeliy s zadannymi fiziko-mekhanicheskimi svoystvami [Development of rational modes of combined thermal deformation effect in the production of lightweight products with specified physical and mechanical properties]. Ufa, 2019. 139 p. (In Russ.).



SHCHIPKOVA Yulia Vladimirovna, Graduate Student, Metal-cutting Machines and Tools Department; Senior Lecturer of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department.

SPIN-code: 1233-2755;

AuthorID (RSCI): 830012

AuthorID (SCOPUS): 57201775187

Correspondence address: ylia_sipkova@mail.ru

For citations

Shchipkova Yu. V. Determination of static and dynamic forces for manufacture of corrugated belts for wind tunnel heat exchangers // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 91–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-91-98.

Received July 9, 2021.

© Yu. V. Shchipkova