

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-20-26>

УДК 621.7.08

## Акустическая методика регистрации начальной скорости деформирования при высокоскоростной штамповке стержневых изделий

Асп. К. Ю. Быков<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов<sup>1)</sup>, С. А. Ленкевич<sup>1)</sup>, В. В. Власов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023  
Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** Разработана акустическая методика и получены выражения для определения начальной скорости деформирования  $v_0$  при высокоскоростной штамповке стержневых изделий, позволяющие найти наиболее рациональную схему расположения записывающего устройства относительно элементов установки. Сущность разработанной методики заключается в регистрации с помощью записывающего устройства звуковых волн, образующихся в процессе вылета ударника из ствола установки и его дальнейшего соударения с формообразующим пуансоном с последующим нахождением времени  $\Delta t$ , за которое ударник проходит расстояние между двумя известными точками своей траектории. В свою очередь, величина  $\Delta t$  определяется как разность между временем регистрации звуковой волны, образовавшейся от вылета ударника из ствола установки, и временем регистрации звуковой волны, образовавшейся от соударения ударника с формообразующим пуансоном. Начальная скорость деформирования, зарегистрированная с помощью разработанной методики в ходе реализации процесса высокоскоростной штамповки стержневых изделий, составила  $v_0 = 115,46$  м/с.

**Ключевые слова:** методика измерения, звуковая волна, схема деформирования, высокоскоростная штамповка, записывающее устройство, схема расположения, звуковая дорожка

**Для цитирования:** Акустическая методика регистрации начальной скорости деформирования при высокоскоростной штамповке стержневых изделий / К. Ю. Быков [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 20–26. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-20-26>

## Acoustic Method for Recording Initial Deformation Rate at High-Speed Forging of Rod Products

К. Yu. Bykov<sup>1)</sup>, I. V. Kachanov<sup>1)</sup>, S. A. Lenkevich<sup>1)</sup>, V. V. Vlasov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** An acoustic methodology has been developed and expression have been obtained for determining the initial deformation rate  $v_0$  during high-speed forging of rod products. The most rational layout of the recording device relative to the installation elements has been established while using the obtained expressions. The essence of the developed technique lies in recording, using a recording device, sound waves generated during the departure of the impactor from the shaft

### Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 249-56-77  
hidrokaf@bntu.by

### Address for correspondence

Kachanov Igor V.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 249-56-77  
hidrokaf@bntu.by

of the installation and its further collision with the shaping punch, followed by finding the time  $\Delta t$  during which the impactor travels the distance  $L$  between two known points of its trajectory. In turn, the value  $\Delta t$  is defined as the difference between the recording time of the sound wave generated by the departure of the impactor from the shaft of the installation, and the recording time of the sound wave generated by the collision of the impactor with the shaping punch. The initial deformation rate, registered using the developed technique during the implementation of the process of high-speed forging of rod products, was  $v_0 = 115.46$  m/s.

**Keywords:** measurement technique, sound wave, deformation scheme, high-speed forging, recording device, layout plan, soundtrack

**For citation:** Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Lenkevich S. A., Vlasov V. V. (2023) Acoustic Method for Recording Initial Deformation Rate at High-Speed Forging of Rod Products. *Science and Technique*. 22 (1), 20–26. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-20-26> (in Russian)

## Введение

Для оценки напряженно-деформированного состояния заготовки и выбора режимов нагружения при высокоскоростной штамповке необходимо иметь представление о взаимосвязи начальных параметров процесса (начальная скорость деформирования  $v_0$ , начальная температура заготовки и т. д.) и конечного результата деформации при выдавливании заготовок из различных материалов. Если начальные параметры процесса выбраны неправильно, то эффективность деформации заготовок значительно уменьшается [1–4].

За счет больших значений скорости (от 25 м/с и выше) и короткой длительности процесса (300–900 мкс) регистрация начальной скорости деформирования, за которую принимается скорость движения инструмента в момент соударения с заготовкой, при высокоскоростной штамповке стержневых изделий является сложной задачей.

В настоящее время для регистрации начальной скорости деформирования  $v_0$  широко используют различные схемы и виды оборудования (фотоэлектронные измерители, осциллографы, хронографы, высокоскоростные фото- и видеокамеры и т. д.). Авторами [4] разработаны схемы дискретного и непрерывного действия, позволяющие производить регистрацию начальной скорости деформирования  $v_0$ , полученной за счет поочередного затемнения и освещения фотодиода, в виде осциллограммы. В работах [5, 6] описаны применяемые скоростные съемочные камеры, а в [7–9] – сверхскоростные фоторегистраторы. Однако по тем или иным причинам (особенности конструкции оборудования, габаритные размеры

инструмента, дороговизна измерительного оборудования, сложность синхронизации моментов начала деформации и съемки и т. д.) предложенные методики регистрации начальной скорости деформирования не всегда могут быть использованы.

В данной работе предложена акустическая методика регистрации начальной скорости деформирования при высокоскоростной штамповке стержневых изделий.

## Основная часть

Предложенная методика регистрации начальной скорости деформирования  $v_0$  использовалась при высокоскоростной штамповке на мощной (с энергией удара до 240 кДж) горизонтальной установке, разработанной на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ, конструктивная схема которой представлена на рис. 1. Данная установка предназначена для получения лабораторных и промышленных образцов инструмента (стержневых и формообразующих деталей штамповой оснастки) [1, 2].

Установка состоит из рамы 1, с одной стороны которой жестко закреплен ствол 2 с клиновым затвором 3, а с другой стороны – сборный шабот 4. На шаботе в регулируемых направляющих 5 и упорах 6 смонтирован выдвигной переходник 7 для крепления штампа. Изменение положения переходника по высоте осуществляется винтом 8. Установка оснащена для снижения уровня шума от выброса газов высокого давления съемным глушителем 9, для обеспечения безопасных условий труда – ловителем 10 [1, 2].

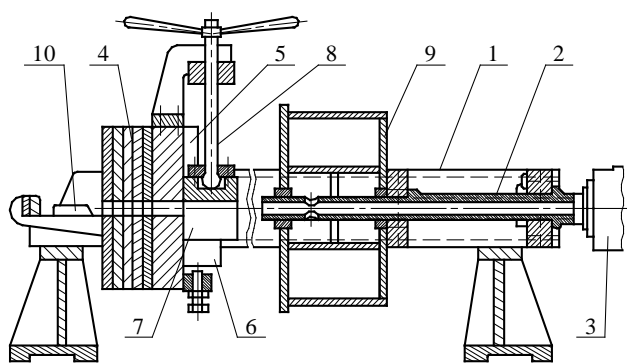


Рис. 1. Конструктивная схема горизонтальной установки с энергией удара 240 кДж [1, 2]

Fig. 1. Structural scheme of horizontal installation with impact energy 240 kJ [1, 2]

Схема высокоскоростной штамповки реализуется следующим образом (рис. 2). Ударник 1, разогнанный с помощью выброса газов высокого давления, вылетает из ствола 2 с начальной скоростью  $v_0$  и соударяется с формообразующим пуансоном 3, который за счет полученного

импульса деформирует предварительно нагретую заготовку 4.

Для регистрации начальной скорости деформирования  $v_0$  разработана акустическая методика, схема регистрации звуковых волн в которой представлена на рис. 3.

При вылете ударника 1 из ствола 2 за счет выброса газов высокого давления на срезе ствола образуется звуковая волна, которая, преодолев расстояние  $l_1$  (расстояние от среза ствола до записывающего устройства 4), регистрируется записывающим устройством. Затем, когда ударник преодолевает путь, равный разности расстояний  $L$  (длина от среза ствола до торцевой плоскости формообразующего пуансона 3) и  $l_y$  (длина ударника), и соударяется с формообразующим пуансоном, образуется вторая звуковая волна, которая, преодолев расстояние  $l_2$  (расстояние от торцевой плоскости формообразующего пуансона до записывающего устройства), также регистрируется записывающим устройством.

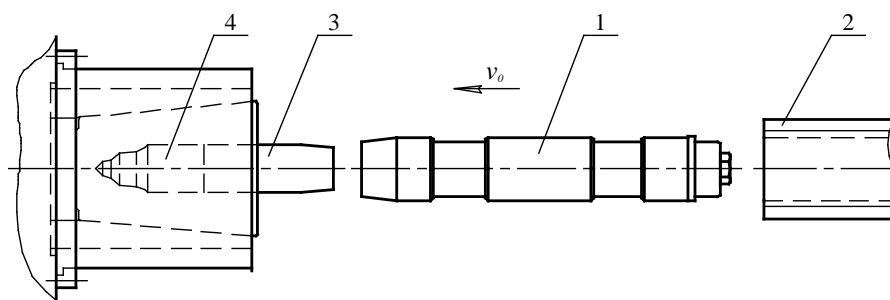


Рис. 2. Схема высокоскоростной деформации

Fig. 2. Scheme of high-speed deformation

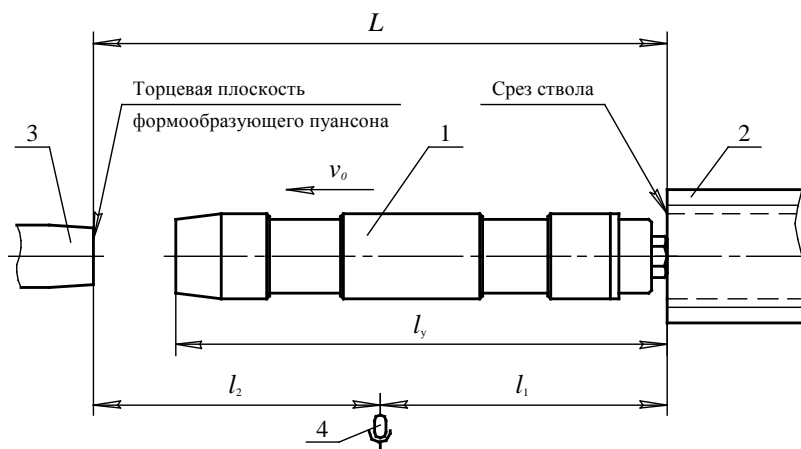


Рис. 3. Схема регистрации звуковых волн

Fig. 3. Scheme for recording sound waves

Расшифровку полученной звуковой дорожки можно производить с помощью как осциллографов (цифровых или аналоговых), так и программных средств, предназначенных для работы со звуком [10–12].

Полученная звуковая дорожка при идеальных условиях записи (отсутствие посторонних шумов, эха и т. д.) имеет вид, схожий с представленным на рис. 4. Так, согласно принятой модели (рис. 3), звуковые волны, образующиеся от выброса газов высокого давления и соударения ударника с формообразующим пуансоном, за счет большой интенсивности будут выделяться характерными пиками. Временной интервал между этими пиками равен времени  $\Delta t$ , за которое ударник преодолевает заведомо известное расстояние.

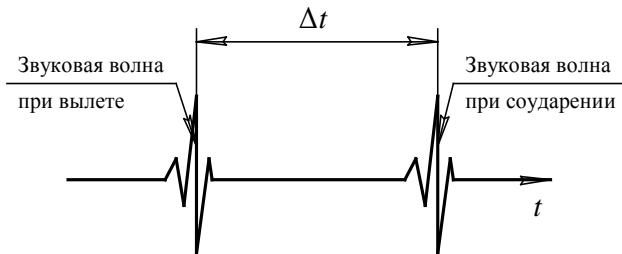


Рис. 4. Теоретическое изображение идеальной звуковой дорожки, получаемой в ходе высокоскоростной штамповки

Fig. 4. Theoretical image of an ideal soundtrack obtained during high-speed forging

Учитывая все вышесказанное, начальную скорость деформирования  $v_0$  определяем по выражению

$$v_0 = \frac{L - l_y}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $v_0$  – начальная скорость деформирования (скорость движения ударника);  $L$  – расстояние между срезом ствола и торцевой плоскостью формообразующего пуансона (рис. 3);  $l_y$  – длина ударника;  $\Delta t$  – время, за которое ударник преодолевает расстояние между срезом ствола и торцевой плоскостью формообразующего пуансона,

$$\Delta t = t_y - t_b, \quad (2)$$

$t_y$  – время соударения ударника и формообразующего пуансона;  $t_b$  – время выброса газов высокого давления из ствола установки.

Для более детального анализа процесса распространения и фиксации звуковых волн, возникающих при вылете ударника из ствола и его последующем соударении с формообразующим пуансоном (рис. 3), рассмотрим теоретическую хронограмму, представленную на рис. 5.

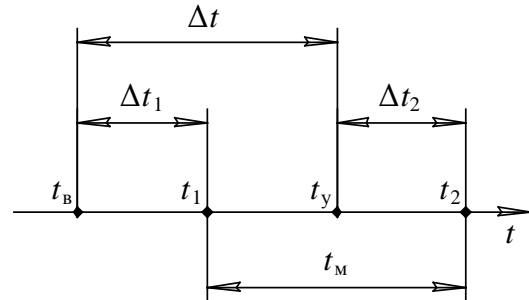


Рис. 5. Теоретическая хронограмма

Fig. 5. Theoretical chronogram

Согласно ранее принятой модели, в момент вылета ударника из ствола образуется звуковая волна, которая на теоретической хронограмме отмечена точкой  $t_b$ , а звуковая волна, характеризующая момент соударения ударника и формообразующего пуансона, отмечена точкой  $t_y$ .

Однако следует учитывать тот факт, что звук имеет собственную скорость распространения (в воздухе при нормальных условиях  $v_{зв} \approx 343,2$  м/с). Таким образом, звуковая волна от вылета ударника из ствола, регистрируемая записывающим устройством, на теоретической хронограмме будет смещена относительно реального времени вылета  $t_b$  на величину  $\Delta t_1$  (время, за которое звуковая волна преодолет расстояние  $l_1$  – от среза ствола до записывающего устройства) и характеризоваться точкой  $t_1$ , а звуковая волна от соударения ударника и формообразующего пуансона, регистрируемая записывающим устройством, будет смещена относительно реального времени соударения  $t_y$  на величину  $\Delta t_2$  (время, за которое звуковая волна преодолет расстояние  $l_2$  – от торцевой плоскости формообразующего пуансона до записывающего устройства) и характеризоваться точкой  $t_2$ .

Исходя из вышесказанного, значения времени  $t_y$  и  $t_b$  будут определяться выражениями:

$$t_b = t_1 - \Delta t_1, \quad (3)$$

где  $t_1$  – время регистрации записывающим устройством звуковой волны на срезе ствола в момент вылета ударника;  $\Delta t_1$  – то же, за которое звуковая волна преодолевает расстояние  $l_1$ ;

$$t_y = t_2 - \Delta t_2, \quad (4)$$

где  $t_2$  – время регистрации записывающим устройством звуковой волны в момент соударения ударника и формообразующего пуансона;  $\Delta t_2$  – то же, за которое звуковая волна преодолевает расстояние  $l_2$ .

В свою очередь, слагаемые  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , входящие в состав выражений (3) и (4), будут определяться по зависимостям:

$$\Delta t_1 = \frac{l_1}{v_{зв}}, \quad (5)$$

где  $l_1$  – расстояние от среза ствола до записывающего устройства;  $v_{зв}$  – скорость звука;

$$\Delta t_2 = \frac{l_2}{v_{зв}}, \quad (6)$$

где  $l_2$  – расстояние от торцевой плоскости формообразующего пуансона до записывающего устройства.

Выражение (1) с учетом (2)–(6) принимает вид

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1) + \left( \frac{l_1 - l_2}{v_{зв}} \right)}. \quad (7)$$

Анализ входящих в знаменатель выражения (7) слагаемых показывает, что первое слагаемое отражает разность между временем вылета ударника из ствола и временем соударения ударника и формообразующего пуансона, регистрируемыми записывающим устройством, а второе слагаемое является поправкой на скорость звука.

Проведя более детальный анализ выражения (7), можно установить, что существуют три предельные схемы расположения записывающего устройства относительно среза ство-

ла и торцевой плоскости формообразующего пуансона.

Первый случай, когда записывающее устройство расположено непосредственно возле среза ствола, т. е.  $l_1 = 0$ . Тогда выражение (7) примет вид

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1) - \left( \frac{l_2}{v_{зв}} \right)}. \quad (8)$$

Второй случай, когда записывающее устройство расположено непосредственно возле торцевой плоскости формообразующего пуансона, т. е.  $l_2 = 0$ . Тогда (7) запишем

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1) + \left( \frac{l_1}{v_{зв}} \right)}. \quad (9)$$

Третий случай, когда записывающее устройство расположено равноудаленно между срезом ствола и торцевой плоскостью формообразующего пуансона, т. е.  $l_1 = l_2$ . С учетом этого (7) принимает вид

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1)}. \quad (10)$$

Данная схема размещения записывающего устройства является наиболее рациональной, так как в этом случае поправка на скорость звука будет равняться нулю, что, в свою очередь, упрощает необходимые расчеты.

В ходе реализации процесса высокоскоростной штамповки стержневых изделий получено действительное изображение звуковой дорожки, представленное на рис. 6. Данное изображение несколько отличается от теоретического, что объясняется короткой длительностью процесса, а также различной интенсивностью звуковой волны, исходящей от выброса газов высокого давления и соударения ударника с формообразующим пуансоном.

Запись звука производилась по схеме с равноудаленным расположением записывающего устройства относительно среза ствола и торцевой плоскости формообразующего пуансона. Длина ударника, которую замеряли с помощью

штангенциркуля ШЦ-II-400-0,05 (ГОСТ 166-89), составила  $l_y = 336$  мм (погрешность измерения  $\pm 0,05$  мм). Расстояние  $L$  от среза ствола до торцевой плоскости формообразующего пуансона, измеренное с помощью лазерного дальномера Bosch GLM 40, составило  $L = 448$  мм, при этом точность измерения, согласно паспортным данным прибора, равнялась  $\pm 1,5$  мм. Запись звуковой дорожки осуществляли с помощью микрофона Behringer C-1 и звуковой карты Behringer U-Phoria с частотой дискретизации 192 кГц, а ее расшифровку – с помощью программного обеспечения Audacity.

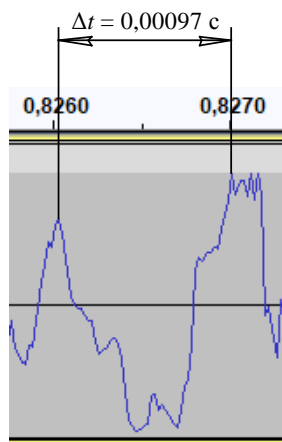


Рис. 6. Действительная звуковая дорожка, полученная в ходе высокоскоростной штамповки

Fig. 6. Actual soundtrack obtained by high-speed forging

Исходя из принятой схемы расположения записывающего устройства, рассчитаем начальную скорость деформирования  $v_0$  по выражению (10)

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1)} = \frac{0,448 \text{ м} - 0,336 \text{ м}}{0,00097 \text{ с}} = 115,46 \text{ м/с}. \quad (11)$$

Таким образом, полученные выражения (7)–(10) позволяют не только определить начальную скорость деформирования  $v_0$ , но и выбрать предпочтительную схему размещения записывающего устройства относительно элементов установки.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана акустическая методика определения начальной скорости деформирования

$v_0$  при высокоскоростной штамповке стержневых изделий, включающая регистрацию звуковых волн, образующихся в процессе вылета ударника из ствола установки и его последующего соударения с формообразующим пуансоном.

2. Установлена наиболее рациональная схема расположения записывающего устройства относительно элементов установки.

3. Получены выражения для определения начальной скорости деформирования  $v_0$  при высокоскоростной штамповке стержневых изделий в зависимости от схемы расположения записывающего устройства относительно элементов установки.

4. Начальная скорость деформирования, зарегистрированная с помощью разработанной методики в ходе реализации процесса высокоскоростной штамповки стержневых изделий, составила  $v_0 = 115,46$  м/с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. Минск: Технопринт, 2002. 327 с.
2. Здор, Г. Н. Технология высокоскоростного деформирования материалов / Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, И. В. Качанов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
3. Барановский, М. А. Влияние начальной скорости деформирования и массы пуансон-бойка на удельную энергию деформирования / М. А. Барановский // Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 5. Минск: Вышэйш. шк., 1974. С. 72–75.
4. Качанов, И. В. Регистрация кинематических параметров процесса ударного выдавливания стержневых изделий с плакированием торца / И. В. Качанов, В. Н. Шарий // Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 31. Минск: БНТУ, 2008. С. 198–207.
5. Беляев, В. И. Высокоскоростная деформация металлов / В. И. Беляев [и др.]. Минск: Наука и техника, 1976. 224 с.
6. Капранов, В. Н. Исследование процесса высокоскоростного горячего выдавливания полостей кузнечных штампов: автореф. ... дис. канд. техн. наук / В. Н. Капранов. Омск, 1974. 19 с.
7. Анципорович, П. П. Пластическое течение металлов и сплавов при холодном высокоскоростном выдавливании: автореф. ... дис. канд. техн. наук / П. П. Анципорович. Минск, 1970. 17 с.
8. Исследование кинематических и силовых параметров высокоскоростного прессования / Л. С. Шабека

- [и др.] // *Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 1*. Минск: Вышэйш. шк., 1970. С. 77–79.
9. Вагин, В. А. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов / В. А. Вагин, Г. Н. Здор, В. С. Мамутов. Минск: Наука и техника, 1990. 207 с.
10. Дьяконов, В. П. Современная осциллография и осциллографы / В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс, 2013. 320 с. (Библиотека инженера).
11. Афонский, А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс, 2010. 248 с. (Библиотека инженера).
12. Афонский, А. А. Измерительные приборы и массовые электронные измерения / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс, 2010. 544 с. (Библиотека инженера).

Поступила 02.12.2022

Подписана в печать 04.01.2023

Опубликована онлайн 31.01.2023

#### REFERENCES

1. Kachanov I. V. (2002) *High-Speed Hot Extrusion of Rod Products*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 327 (in Russian).
2. Zdor G. N., Isaevich L. A., Kachanov I. V. (2010) *Technology of High-Speed Material Deformation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 456 (in Russian).
3. Baranovsky M. A. (1974) Influence of the Initial Deformation Rate and the Mass of the Punch-Striker on the Specific Deformation Energy. *Metallurgiya: Resp. Mezhd. Sb. Nauch. Tr. Vyp. 5* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers. Iss. 5]. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 72–75 (in Russian).
4. Kachanov I. V., Shary V. N. (2008) Registration of Kinematic Parameters of the Process of Impact Extrusion of Core Products with End Cladding. *Metallurgiya: Resp.*

- Mezhved. Sb. Nauch. Tr. Vyp. 31* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers. Iss. 31]. Minsk, Belarusian National Technical University. 198–207 (in Russian).
5. Belyaev V. I., Kovalevskii V. N., Smirnov G. V., Chekan V. A. (1976) *High-Speed Deformation of Metals*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 224 (in Russian).
6. Kapranov V. N. (1974) *Study of the Process of High-Speed Hot Extrusion of Cavities of Forging Dies*. Omsk. 19 (in Russian).
7. Antsiptorovich P. P. (1970) *Plastic Flow of Metals and Alloys during Cold High-Speed Extrusion*. Minsk. 17 (in Russian).
8. Shabeka L. S. [et al.] (1970) Study of Kinematic and Power Parameters of High-Speed Pressing. *Metallurgiya: Resp. Mezhd. Sb. Nauch. Tr. Vyp. 1* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers. Iss. 1]. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 77–79 (in Russian).
9. Vagin V. A., Zdor G. N., Mamutov V. S. (1990) *Methods for Studying High-Speed Seformation of Metals*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 207 (in Russian).
10. Dyakonov V. P. (2013) *Modern Oscillography and Oscilloscopes. Series "Engineer's Library"*. Moscow, SOLON-Press Publ. 320 (in Russian).
11. Afonsky A. A., Dyakonov V. P. (2010) *Digital Spectrum, Signal and Logic Analyzers. Series "Engineer's Library"*. Moscow, SOLON-Press Publ. 248 (in Russian).
12. Afonsky A. A., Dyakonov V. P. (2010) *Measuring Instruments and Mass Electronic Measurements. Series "Engineer's Library"*. Moscow, SOLON-Press Publ. 544 (in Russian).

Received: 02.12.2022

Accepted: 04.01.2023

Published online: 31.01.2023