



УДК 621.771

Поступила 26.01.2015

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ПОЛОС ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С ЛОКАЛЬНЫМ ИЗГИБОМ EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE PROCESS OF ROLLING STRIPS OF VARIABLE THICKNESS WITH A LOCAL BEND

В. А. КОРОЛЬ, Л. А. ИСАЕВИЧ, Д. М. ИВАНИЦКИЙ, Белорусский национальный технический университет, А. И. ГОРДИЕНКО, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
V. A. KOROL', L. A. ISAEVICH, D. M. IVANICKIJ, Belarusian national technical university, A. I. GORDIENKO, Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Рассмотрены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований процесса прокатки полосовых заготовок на профилированной оправке с использованием двух схем обработки.

The results of computer simulation and experimental investigations of the rolling process of strip blanks on the profiled mandrel using two processing schemes.

Ключевые слова. Полоса переменной толщины, горячая продольная прокатка, профилированная оправка, гладкий валок, профилированный валок.

Keywords. Strip of variable thickness, longitudinal hot rolling, shaped mandrel, smooth roll, shaped roll.

Для экспериментальных исследований процесса горячего пластического формообразования полос переменной толщины при оптимальных режимах обработки рессорно-пружинной стали были разработаны две схемы деформирования и сконструирован инструмент для их реализации [1]. Заготовку перед прокаткой устанавливают на специальной профилированной оправке и прокатывают между двумя гладкими валками (рис. 1, а) в первом варианте и между гладким нижним и профилированным верхним валками во втором варианте (рис. 1, б).

Для обеих схем в процессе исследований было проведено компьютерное моделирование изучаемого процесса.

По первой схеме формообразование полосы производили прокаткой в двух гладких валках на оправке с продольным пазом, повторяющим профиль готового изделия (рис. 2).

В качестве заготовок использовали прямоугольные полосы толщиной 12 мм, шириной 20 мм из стали 60С2, нагретые до 900 °С. Прокатку производили без использования смазки. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

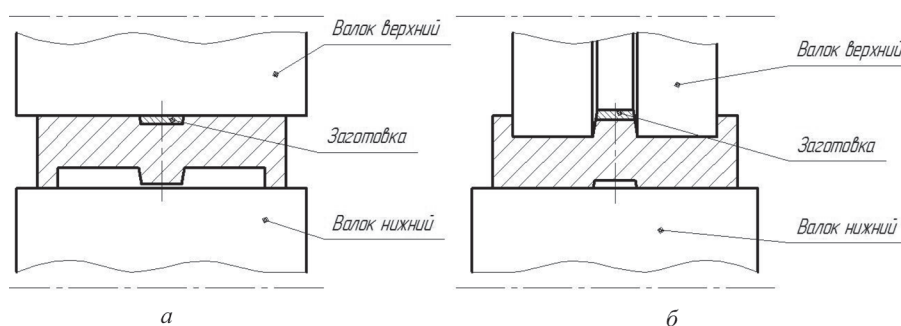


Рис. 1. Схемы вариантов прокатки полос переменной толщины

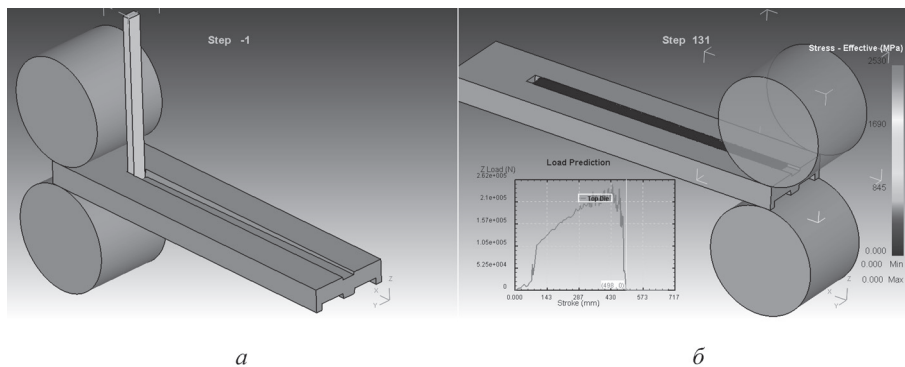


Рис. 2. Схема продольной прокатки полосы переменной толщины в гладких валках на оправке с продольным пазом (а) и результаты компьютерного моделирования (б)

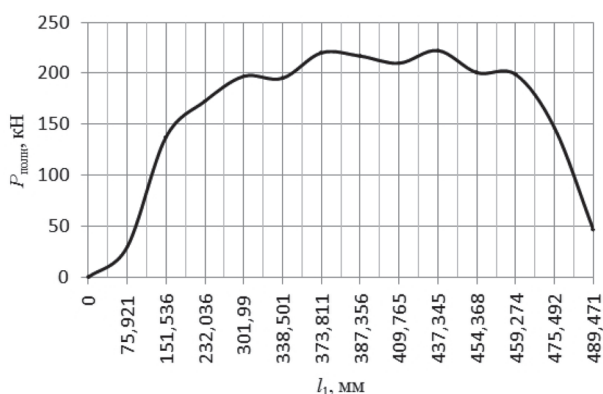


Рис. 3. Зависимость усилия деформирования $P_{\text{полн}}$ от величины перемещения оправки в направлении прокатки l_1 для стали 60С2

В процессе проведения моделирования необходимо было подобрать длину исходной заготовки, при которой произойдет полное заполнение рабочего ручья профилированной оправки, с учетом припуска на обрезку конечного участка изделия. По результатам моделирования определили размеры исходной заготовки $a \times h \times l = 20 \times 12 \times 280$ мм.

Моделирование проводили с использованием специальной компьютерной программы для процессов обработки материалов. Построенный в процессе исследований график зависимости усилия деформирования $P_{\text{полн}}$ от величины перемещения оправки в направлении прокатки l_1 показан на рис. 3.

Как видно из рисунка, при минимальной толщине готового изделия 4 мм усилие прокатки составляет 250 кН. Основным недостатком предложенной схемы

формообразования является искажение формы готового изделия, а именно образование заусенца значительных размеров на боковых кромках заготовки в местах наибольших обжатий. Приведенный недостаток – это неисправимый брак и для его устранения была предложена другая схема деформирования. Она заключается в продольной прокатке полосы на профилированной оправке в одном гладком валке и другом профилированном (рис. 4). На верхнем валке выполнен трапецевидный ручей, а на профилированной оправке – выступ, образующий замкнутый калибр.

В качестве заготовок использовали полосы толщиной 12 мм, шириной 20 мм из стали 60С2, нагретые до 900 °С. Прокатку также производили без использования смазки. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

В процессе проведения моделирования также определяли длину исходной заготовки, при которой произойдет полное заполнение рабочего ручья профилированной оправки, с учетом припуска на обрезку

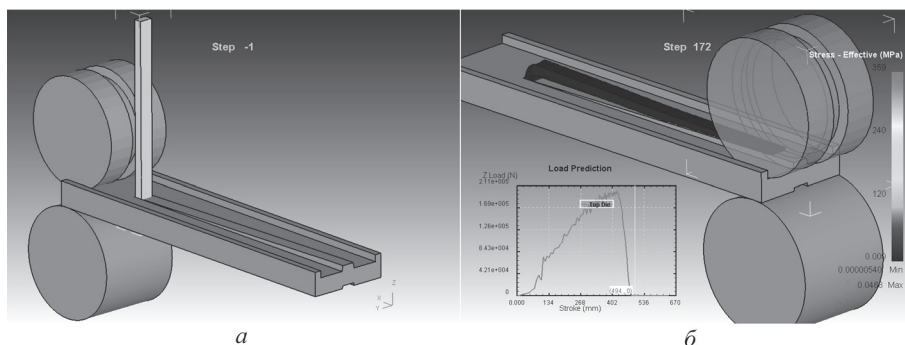


Рис. 4. Схема продольной прокатки полосы переменной толщины на профилированной оправке в закрытом калибре (а) и результаты компьютерного моделирования (б)

концевого участка изделия. Результатом моделирования является расчетная длина исходной заготовки $l = 280$ мм.

Как видно из приведенных результатов компьютерного моделирования, при минимальной толщине готового изделия 4 мм усилие прокатки составляет 200 кН. Эта схема прокатки позволяет избежать образования заусенцев по краям полосы, что характерно при использовании первой схемы (см. рис. 1, а).

Для экспериментальных исследований была использована существующая экспериментальная установка, в конструкции которой за основу принята схема прокатки в приводных гладких валках равного диаметра. Внешний вид установки показан на рис. 6.

Для установления экспериментальных значений давления металла на валки при прокатке полос переменной толщины в валках на профилированной оправке были использованы гидравлический домкрат ДГ25.3913010, ОСТ 37.001.278-84 и манометр МП4-V-100 МПа-2,5-К-С-Р, ТУ 25-02.1101-74. Цена деления манометра 1 МПа. По шкале манометра определяли давление, а усилие прокатки находили из выражения

$$P = p_m F_{ш} \eta_m, \quad (1)$$

где p_m – давление по манометру, МПа; $F_{ш}$ – площадь плунжера, равная 10 000 мм²; η_m – механический КПД, учитывающий потери в уплотнении, принимаем в пределах 0,95–0,97.

Для нагрева заготовок использовали электрическую печь сопротивления камерного типа SNOL 30/1100. Регулирование и контроль температуры в ней осуществляли терморегулятором Z5 SCN, работающим совместно с хромель-алюмелевой термопарой, установленной в камере.

Измерение температуры заготовки производили бесконтактным методом [1] с помощью фотоэлектрического пирометра ФЭП-4М. Пирометр предназначен для измерения температуры металла в интервале температур 800–1700 °С (пять диапазонов). Переход от одного диапазона на другой осуществляется путем замены диафрагмы в объективе пирометра. Погрешность пирометра составляет ±1% от верхнего предела шкалы пирометра.

Затем каждую обработанную заготовку измеряли и сравнивали соответствие полученных данных требованиям конструкторской документации на изделие. Измерения производили с помощью штангенциркуля ШЦ-I-125-0,01 (ГОСТ 166-89) и линейки 500д (ГОСТ 427-75).

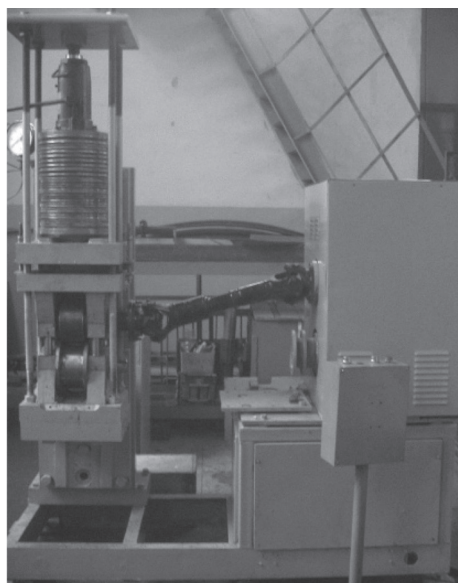


Рис. 6. Внешний вид экспериментальной установки

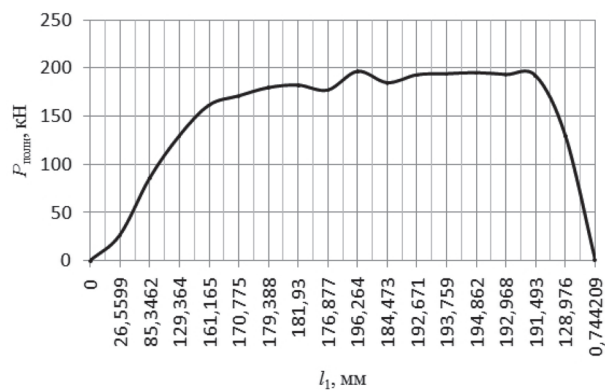


Рис. 5. Теоретическая зависимость усилия деформирования $P_{\text{полн}}$ от величины перемещения оправки в направлении прокатки l_1

В общем случае погрешность измерений энергосиловых параметров представляет собой сумму погрешностей, обусловленных неточностью отсчета $e_o = \pm 5\%$, неточностью измерительного прибора $e_{\text{пр}} = \pm 1,5\%$, погрешностью тарировки прибора $e_{\text{тпр}} = \pm 2,0\%$, соединительной арматуры гидросистемы $e_a = \pm 1,5\%$, а также погрешностью косвенных измерений (погрешность произведения) $e_{\text{ки}} = \pm 0,5\%$ [2]. Изменение температуры окружающего пространства является источником температурной погрешности $e_t = \pm 0,1\%$, обусловленной изменением свойств рабочей жидкости в гидросистеме. Таким образом, полная погрешность измерения энергосиловых параметров составит:

$$e = e_o + e_{\text{пр}} + e_{\text{тпр}} + e_a + e_{\text{ки}} + e_t = \pm 10,6\%.$$

Прокатку заготовок производили при оптимальных режимах обработки рессорно-пружинной стали. Для получения необходимого сочетания механических свойств при горячей прокатке предложено использование высокотемпературной термомеханической обработкой (ВТМО), при которой максимальная температура начала прокатки не должна превышать 900 °С для малых (до 10%) и 850 °С для больших 25–50% степеней деформации. Значитель-

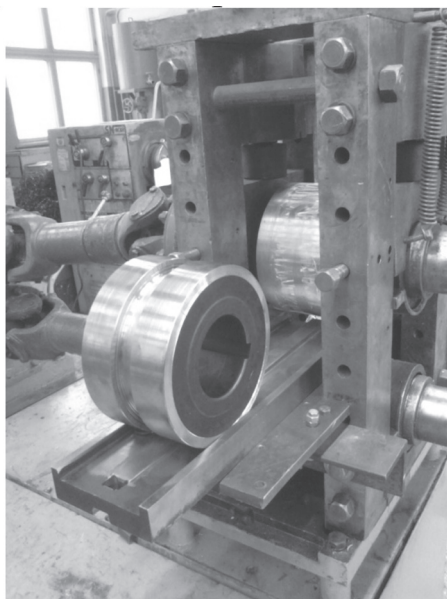


Рис. 7. Внешний вид оправки профилированной и валков для прокатки полос переменной толщины

ная доля упрочнения достигается уже при деформации 25%, дальнейшее увеличение степени деформации практически не обеспечивает прироста предела прочности. Таким же образом изменяется и предел текучести. Характеристики пластичности достигают оптимальных значений также при 25% обжатии и при дальнейшем его увеличении практически не меняются. При повышении температуры прокатки до 1000 °С эффект повышения механических свойств в результате ВТМО полностью отсутствует.

В качестве заготовок для проведения лабораторных испытаний использовали полосы длиной 280 мм, шириной 20 мм и толщиной 12 мм, изготовленные из материалов:

- свинец СЗ (ГОСТ 3778-98), механические свойства которого идентичны свойствам стали, нагретой до температуры горячей штамповки, а именно предел текучести $\sigma_T = 9,3$ МПа и временное сопротивление разрыву $\sigma_B = 15$ МПа, характеристики пластичности $\psi = 60\%$ [3];
- сталь 60С2 (ГОСТ 14959-79) в состоянии поставки с пределом текучести $\sigma_T = 650$ МПа и временным сопротивлением разрыву $\sigma_B = 850$ МПа, характеристики пластичности $\psi = 20\%$, а при нагреве $\sigma_T = 62$ МПа, $\sigma_B = 70$ МПа, $\psi = 50\%$ [4].

При проведении лабораторных экспериментов с целью максимального приближения к промышленным условиям использованы специальные методические приемы, суть которых заключается в моделировании температурно-деформационных режимов конечной стадии прокатки полос (наиболее важной стадии ВТМО) в клети стана и закалки после определенной выдержки.

Температурный интервал при прокатке с ВТМО ограничивается диапазоном горячей обработки давлением. Деформационные режимы при прокатке с ВТМО не должны существенно отличаться от режимов обычной горячей прокатки, поскольку формирование геометрии периодического профиля подчиняется одним и тем же законам.

Заготовки нагревали до температуры 900–1050 °С, производили прокатку в течение 24 с, варьируя степень деформации в пределах 10–65%. Далее прокатанные полосы подвергали регламентированной выдержке для выравнивания температуры по сечению и интенсивному охлаждению в масле в специально оборудованной ванне, находящейся рядом со станом. Затем проводили отпуск полос при температуре 380–440 °С.

На рис. 7 приведен внешний вид деформирующего инструмента (оправка и валки) для продольной прокатки полос переменной толщины.

Внешний вид полосовых заготовок показан на рис. 8, а, а готовых изделий полос переменной толщины – на рис. 8, б.

Схемы прокатки (см. рис. 1, а, б) были осуществлены в лабораторных условиях. Экспериментальные зависимости усилия прокатки $P_{\text{полн}}$ свинцовых заготовок от величины перемещения оправки в направлении прокатки l_1 приведены на рис. 9.

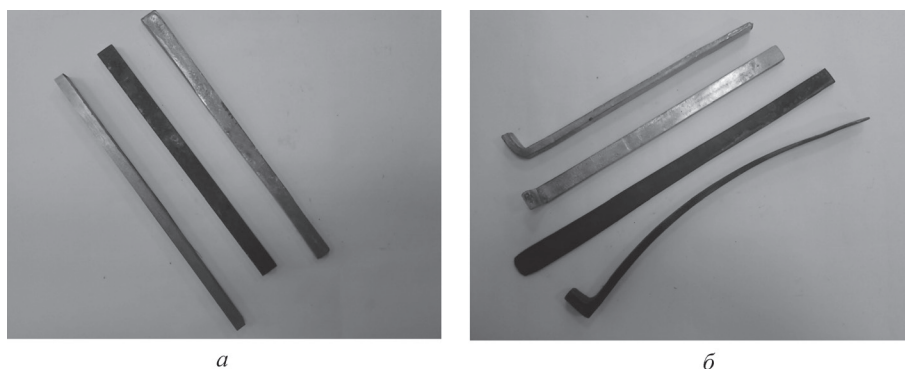


Рис. 8. Внешний вид заготовок (а) и готовых изделий (б) полос переменной толщины

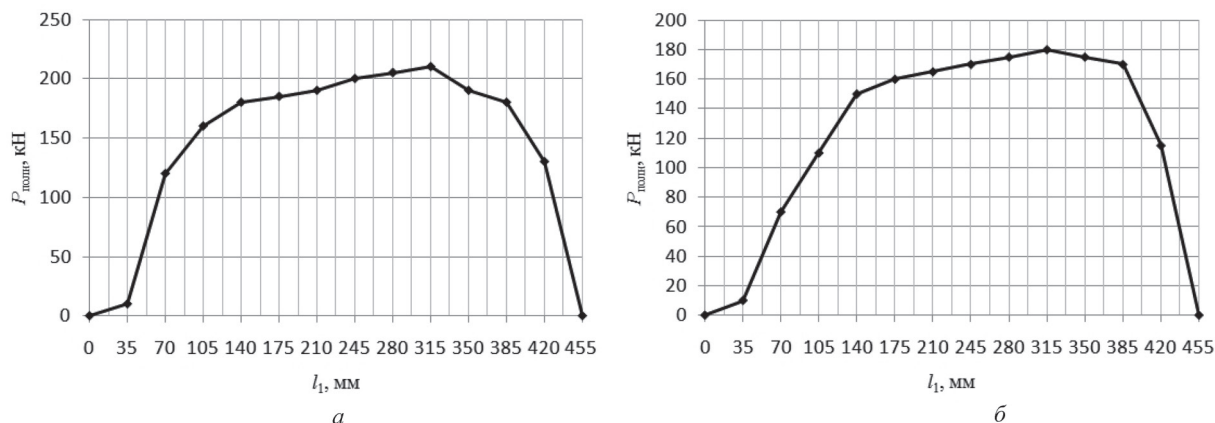


Рис. 9. Экспериментальные зависимости усилия прокатки $P_{\text{полн}}$ свинцовых заготовок от величины перемещения оправки в направлении прокатки l_1 : а – прокатка по схеме рис. 1, а; б – прокатка по схеме рис. 1, б

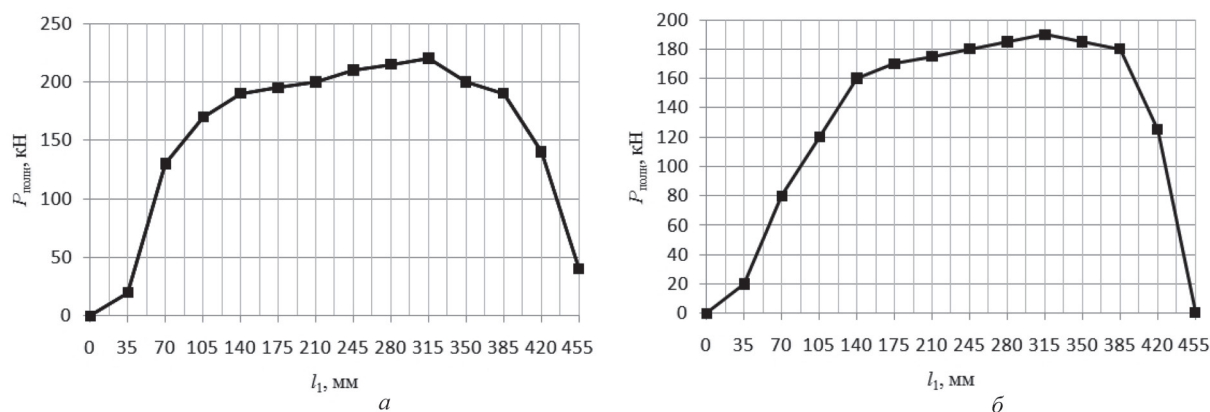


Рис. 10. Экспериментальные зависимости усилия прокатки $P_{\text{полн}}$ заготовок из стали 60С2 от величины перемещения оправки в направлении прокатки l_1 : а – прокатка по схеме рис. 1, а; б – прокатка по схеме рис. 1, б

Экспериментальные зависимости усилия прокатки $P_{\text{полн}}$ заготовок из стали 60С2 от величины перемещения оправки в направлении прокатки l_1 приведены на рис. 10.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что теоретические значения усилия прокатки несколько меньше экспериментальных, что вполне согласуется с физическими представлениями о механизме деформирования, поскольку в расчетах был использован метод нижней оценки (метод плоских сечений). Также следует отметить, что при прокатке по схеме рис. 1, б усилие обжатия ниже, чем при прокатке по схеме рис. 1, а. Это объясняется тем, что во второй схеме имеет место рассогласование окружной скорости вращения катающей бочки вала и линейного перемещения оправки из-за разницы диаметра реборды вала и катающего радиуса в калибре.

Литература

1. Пат. РБ ВУ18664 С1. Способ изготовления полосовой заготовки изделия с переменным по длине профилем и устройство для его осуществления / Л. А. Исаевич, В. А. Король, Д. М. Иваницкий, В. И. Пушкевич, выдан 26.06.2014.
2. Головейко, А. Г. Математическая обработка опытных данных / А. Г. Головейко. Минск: Редиздат БПИ, 1960. 116 с.
3. Грудев, А. В. Внешнее трение при прокатке / А. В. Грудев. М.: Металлургия, 1973. 288 с.
4. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов: Справ. / А. В. Третьяков, А. И. Зюзин. М: Металлургия, 1973. 223 с.

References

1. Isaevich L. A., et al. Sposob izgotovlenija polosovoj zagotovki izdelija s peremennym po dljne profilem i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [Method of manufacturing a strip billet products with variable profile by length and device for its implementation]. Patent RB, no. 18664, 2014.
2. Golovajko A. G. Matematicheskaja obrabotka opytnyh dannyh [Mathematical processing of experimental data]. Minsk, Redizdat Publ., 1960. 116 p.

3. Grudev A. V. *Vneshnee trenie pri prokatke* [External friction during rolling]. Moscow, Metallurgija Publ., 1973. 288 p.

4. Tret'jakov A. V. *Mehanicheskie svojstva metallov i splavov: Spravochnik* [Mechanical properties of metals and alloys in the processing of metals: Reference]. Moscow, Metallurgija Publ., 1973. 223 p.

Сведения об авторах

Исаевич Леонид Александрович, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 65.

Иваницкий Денис Михайлович, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет, Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 65, тел. (+ 37517) 296 67 76, (+ 37529) 708 28 41; E-mail: denisrodman@tut.by.

Information about the authors

Isaevich Leonid, doctor of technical sciences, professor, Belarusian National Technical University, Minsk, RB, Independence avenue, 65.

Ivanickij Denis, Candidate of technical sciences, Belarusian National Technical University, Minsk, RB, Independence avenue, 65, tel. (+ 37517) 296 67 76, (+ 37529) 708 28 41, E-mail: denisrodman@tut.by.