

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 621.787

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-310-316>

Поступила в редакцию 18.02.2020

Received 18.02.2020

В. В. Домасевич¹, Т. А. Ахметов¹, М. П. Кульгейко²

¹ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Жлобин, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СИЛЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ ПРИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ
МЕТОДОМ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ**

Аннотация. Рассмотрены основные факторы процесса алмазного выглаживания: сила контактного взаимодействия инструмента и детали в зоне деформации и трение на контактной поверхности детали и выглаживателя. Представлена методика аналитического определения оптимальной силы выглаживания для отделочно-упрочняющего режима обработки. Расчетным путем получены значения силы для некоторых характерных марок материалов небольшой и средней твердости (≤ 210 HB, радиус индентора – 3,4 мм) и ряда закаленных сталей высокой твердости (радиус индентора – 2,0 мм). Также определены значения сил с использованием выражений для деформационной составляющей коэффициента трения. Сравнительный анализ результатов свидетельствует о достаточной для практических целей адекватности вариантов расчета. На конкретных примерах обрабатываемых материалов показаны графические зависимости, отражающие связь коэффициента трения, в том числе его деформационной составляющей, и силы выглаживания. С увеличением силы выглаживания увеличивается коэффициент трения, что объясняется увеличением глубины внедрения алмазного наконечника и, следовательно, ростом деформационной составляющей. Глубина внедрения индентора в обрабатываемую поверхность, а следовательно, коэффициент трения при выглаживании зависит от твердости обрабатываемого материала. С повышением твердости глубина внедрения уменьшается, что приводит к снижению деформационной составляющей и в целом коэффициента трения. На коэффициент трения также влияет радиус рабочей части инструмента, так как от его величины тоже зависит глубина внедрения индентора. Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологии отделочно-упрочняющего алмазного выглаживания, освоении процесса и внедрении его в производство.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, отделочно-упрочняющий режим, сила выглаживания, коэффициент трения

Для цитирования: Домасевич, В. В. Определение оптимальной силы контактного взаимодействия инструмента и детали при отделочно-упрочняющей обработке методом алмазного выглаживания / В. В. Домасевич, Т. А. Ахметов, М. П. Кульгейко // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 310–316. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-310-316>

Vitaliy V. Domasevich¹, Timur A. Ahmetov¹, Mikhail P. Kulgeyko²

¹OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Belarus

²Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL STRENGTH OF CONTACT INTERACTION OF THE TOOL
AND THE PART DURING FINISHING-HARDENING TREATMENT BY DIAMOND SMOOTHING**

Abstract. The main factors of the process of diamond smoothing are considered in the work: the force of the contact interaction of the tool and the part in the deformation zone and the friction on the contact surface of the part and the smoother. The technique of analytical determination of the optimal smoothing force for the finishing-hardening treatment mode is presented. The calculated values were obtained for some characteristic grades of materials of small and medium hardness (≤ 210 HB, indenter radius 3.4 mm) and a number of hardened steels of high hardness (indenter radius 2.0 mm). The force

толщину упрочненного слоя [11, 12]. Таким образом, сила выглаживания является одним из наиболее важных параметров процесса, позволяющим регулировать в широких пределах качество поверхности. Поэтому выбор оптимальной силы является актуальной задачей при реализации технологии отделочно-упрочняющего алмазного выглаживания.

Цель исследования – определение оптимальной силы выглаживания при отделочно-упрочняющем режиме обработки мягких материалов (≤ 210 НВ) и закаленных сталей и установление зависимости коэффициента трения и силы выглаживания.

Методика определения оптимальной силы выглаживания и коэффициента трения. В процессе выглаживания сила P раскладывается на несколько составляющих: нормальную P_y , тангенциальную P_z и силу подачи P_x .

На основании приближенного решения задачи о скольжении жесткого радиусного выглаживателя по пластической поверхности зависимости P_x , P_y и P_z можно представить следующими уравнениями [13]:

$$P_x = C_x R^{0,5} h^{1,5} \sigma_T, \quad (1)$$

$$P_y = C_y R h \sigma_T, \quad (2)$$

$$P_z = C_z R^{0,5} h^{1,5} \sigma_T, \quad (3)$$

где C_x , C_y , C_z – коэффициенты, учитывающие конкретные условия обработки; R – радиус рабочей части выглаживателя, мм; h – глубина внедрения выглаживателя, мм; σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, Па.

Основной является составляющая P_y , значение которой и принимаем за силу выглаживания.

Заменяв в формуле (2) абсолютную глубину внедрения выглаживателя h относительной глубиной внедрения $\varepsilon = h/R$, получаем

$$P = C \varepsilon \sigma_T R^2. \quad (4)$$

Так как величина предела текучести σ_T не всегда известна, воспользуемся величиной твердости по Виккерсу, позволяющей определить твердость как твердых, так и мягких материалов в единицах одной шкалы.

Для учета масштабного фактора, связанного с соотношением радиусов инструмента и обрабатываемой детали, заменим в формуле (4) радиус инструмента R приведенным радиусом [4]:

$$R = \frac{DR}{D + R}, \quad (5)$$

где D – диаметр обрабатываемой детали, мм.

После преобразований получаем следующее выражение:

$$P = C \varepsilon H V \left(\frac{DR}{D + R} \right)^2, \quad (6)$$

в котором C – коэффициент, $C = \pi$ [13].

Нормальное протекание процесса выглаживания происходит при определенных значениях относительной глубины внедрения ε инструмента в обрабатываемую поверхность. При относительной глубине внедрения, меньшей определенной величины ε_1 , инструмент с обрабатываемой поверхностью имеет упругую связь и выглаживания не происходит. При относительной глубине внедрения, большей определенной величины ε_2 , пластическое течение материала прекращается и начинается разрушение поверхностного слоя детали. Нормальное протекание процесса обеспечивается при $\varepsilon_2 > \varepsilon > \varepsilon_1$.

Для перехода от упругой деформации к пластической воспользуемся условием по данным И. В. Крагельского [14]:

$$\varepsilon_1 = \frac{h}{R} = 240 \frac{\sigma_T^2}{E^2}. \quad (7)$$

Расчеты показывают [13], что практические значения ε_1 , при которых начинается процесс выглаживания, равны 0,002–0,004 для закаленных сталей и 0,0002–0,0007 – для мягких материалов.

Эксперыменты паказалі, што адносительную глыбину внедрения $\varepsilon_2 = 0,01-0,02$ можна лічыць прадельнай. Неабходная велічыня адносительной глыбины внедрения выбіраецца між мінімальнай і максімальнай на аснове рэкамендацый, прыведзенных далей. Рассчытанная такім чынам сіла выглажывання P павінна забяспечыць атрыманне заданага якаства паверхні.

В працэсе выглажывання ў зоне кантакта інструмента з дэталлю ўзнікаюць сілы трэння, якія ўплываюць на працэс пратэкання пластычнай дэфармацыі, награв інструмента і дэталі, якасць абрабатоўнай паверхні. Трэне ўзнікае ўследствіе дэфарміравання тонкага паверхнага слоя матэрыяла абрабатоўнай дэталі внедрывшымся інструментам і прееадолення адгезійных сувязей, ўзнікаючых між інструментам і абрабатоўнай паверхняй. Устаановлена [15], што ў случае трэння ў ўмовах пластычнага кантакта каэфіцыент трэння можна вызначыць наступным чынам:

$$f = f_{\text{деф}} + f_{\text{адг}}, \quad (8)$$

дзе $f_{\text{деф}}$ – дэфармацыйная складалая каэфіцыента трэння, $f_{\text{адг}}$ – адгезійная складалая каэфіцыента трэння (0,01–0,05).

Змяненне каэфіцыента трэння пры розных рэжымах выглажывання адбываецца за ліч дэфармацыйнай складалой, так як адгезійная складалая залежыць толькі ад абрабатоўнага матэрыяла і яго шэрохаватасці і не залежыць ад рэжымаў абрабатоўкі.

Дэфармацыйная складалая каэфіцыента трэння можа быць рэассчытана па фармуле [13]

$$f_{\text{деф}} = \frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{P}{HV}} \quad (9)$$

ілі

$$f_{\text{деф}} = 0,55 \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (10)$$

Прыравняў правыя часткі ўраўненняў (9) і (10), атрымаем

$$\frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{P}{HV}} = 0,55 \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (12)$$

Пасля некаторых пераабразаўванняў выражэнне (12) можна запісаць ў выглядзе

$$\frac{0,1P}{RNV} = 0,3h, \quad (13)$$

адкуль сіла выглажывання

$$P = 3hRNV. \quad (14)$$

Падстаўляў у фармулу (14) выражэнне для h з залежнасці адносительной глыбины внедрения $\varepsilon = h/R$, атрымаем выражэнне для вызначэння сілы выглажывання:

$$P = 3\varepsilon HVR^2. \quad (15)$$

Рэкамендуемыя значэнні адносительного внедрения ε для аддэлачна-ўпручняючага рэжыма абрабатоўкі мяккіх матэрыялаў і закаленых сталей равны 0,0025 і 0,005 адпаведна.

Такім чынам, аптымальнае значэнне сілы выглажывання P для аддэлачна-ўпручняючага рэжыма можна вызначыць па наступным фармулам:

для закаленых сталей і другіх матэрыялаў высокай твёрдасці

$$P = 0,015HVR^2; \quad (16)$$

для матэрыялаў невысокай і сярняй твёрдасці

$$P = 0,0075HVR^2. \quad (17)$$

Пры аптымальных значэннях сілы выглажывання ісходныя неровнасці поўнасцю сглажываюцца і ўтвараецца шэрохаватасць, абумоўленая самім працэсам выглажывання [16]. Далейшае ўзвельчэнне сілы выглажывання ўзвельчваецца пластычныя іскажэння, можа прывесці да разрушэння паверхнага слоя і з'яўленню трэшчын на абрабатоўнай паверхні.

Полученные результаты и их обсуждение. В качестве исходных данных были выбраны образцы $D = 50$ мм некоторых распространенных марок закаленных сталей и мягких материалов, радиус рабочей части алмазного наконечника 2,0 мм и 3,4 мм, соответственно. Исходная шероховатость $Ra = 0,63–1,25$ мкм для закаленных сталей и $Ra = 0,63–5,0$ мкм – для незакаленных сталей и цветных сплавов. В результате выполненных расчетов получены следующие значения силы выглаживания для некоторых марок материалов (табл. 1 и 2). В скобках представлены числовые значения, полученные с использованием выражения для деформационной составляющей коэффициента трения.

Т а б л и ц а 1. Расчетные значения оптимальной силы при отделочно-упрочняющем режиме обработки мягких сталей и сплавов (≤ 210 HB) при $\varepsilon = 0,0025$, $R = 3,4$ мм

Table 1. Calculated values of the optimal force with the finishing and hardening mode of handling of soft steels (≤ 210 HB) when $\varepsilon = 0.0025$, $R = 3.4$ mm

Марка материала	Вид термической обработки	HB, не более	Предел текучести σ_b , Н/мм ²	HRC	HV	P , Н
Сталь 45	Нормализация	197	275	–	197	157 (171)
Сталь 20X	Нормализация	167	215	–	167	133 (145)
Латунь литейная ЛЦ40С	–	70	–	–	70	56 (61)
Алюминиевый литейный сплав АК12	–	50	–	–	50	40 (43)

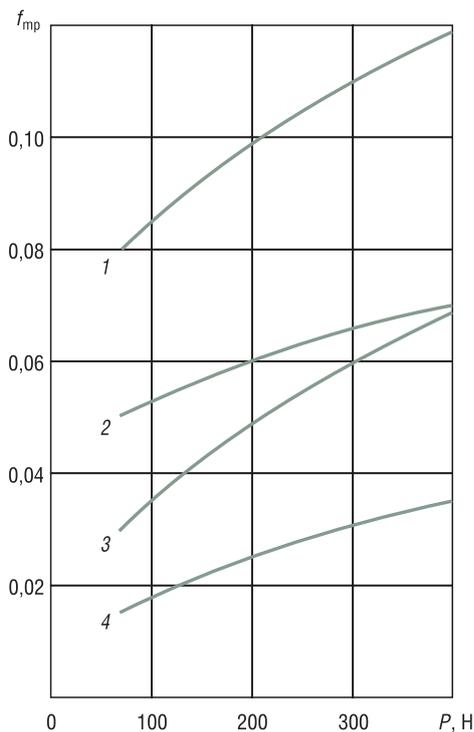


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения f_{tr} (кривые 1 и 3, сталь 45, 197 HB, $R = 3,4$ мм) и его деформационной составляющей $f_{деф}$ (кривые 2 и 4, сталь 9XC, 63 HRC, $R = 2,0$ мм) от силы P

Fig. 2. Dependence of the coefficient of friction f_{tr} (curves 1 and 3, steel 45, 197 HB, $R = 3.4$ mm) and its deformation component f_{def} (curves 2 and 4, steel 9XC, 63 HRC, $R = 2.0$ mm) on the force P

Т а б л и ц а 2. Расчетные значения оптимальной силы при отделочно-упрочняющем режиме обработки закаленных сталей при $\varepsilon = 0,005$, $R = 2,0$ мм

Table 2. Calculated values of the optimum strength during the finishing-hardening treatment of hardened steels when $\varepsilon = 0.005$, $R = 2.0$ mm

Марка материала	Вид термической обработки	HB, не более	Предел текучести σ_b , Н/мм ²	HRC	HV	P , Н
Сталь ШХ15	Закалка, низкий отпуск	480	1030	–	501	291 (301)
Сталь 9XC	Закалка, низкий отпуск	–	–	63	763	443 (459)
Сталь ХВГ	Закалка, низкий отпуск	–	–	61	715	415 (429)
Сталь 110Г13Л	–	229	380	–	229	133 (137)

Расхождение расчетных значений двух вариантов определения силы выглаживания составляет до 4 % для закаленных сталей и до 9 % для мягких материалов. В целом результаты свидетельствуют об адекватности методик, а полученные значения следует рассматривать как ориентировочные при разработке технологии алмазного выглаживания. Окончательно режимы обработки уточняются экспериментально при внедрении процесса в производство.

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициента трения f_{tr} и его деформационной составляющей $f_{деф}$ от силы P при алмазном выглаживании некоторых сталей. Значения деформационной составляющей

коэффициента трения $f_{\text{деф}}$ рассчитаны по формуле (9). Адгезионная составляющая принята $f_{\text{адг}} = 0,035$ – для закаленных сталей и $f_{\text{адг}} = 0,05$ – для нормализованных сталей [13]. При увеличении силы выглаживания коэффициент трения и его деформационная составляющая растут, а адгезионная составляющая остается примерно постоянной. Аналогичный вид имеет зависимость коэффициента трения от глубины внедрения выглаживателя. Коэффициент трения зависит также от твердости обрабатываемого материала. Установлено, что с увеличением твердости коэффициент трения уменьшается, что объясняется уменьшением его деформационной составляющей [см. (10)].

Заключение. Представленная методика определения силы взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью позволяет установить оптимальное значение силы выглаживания для отделочно-упрочняющего режима обработки. В качестве примера приведены результаты расчета силы выглаживания для некоторых марок мягких материалов (радиус наконечника $R = 3,4$ мм) и закаленных сталей ($R = 2,0$ мм), в том числе через деформационную составляющую коэффициента трения. Отмечается достаточная для практических целей сходимость результатов по двум вариантам расчета. С увеличением силы выглаживания увеличивается коэффициент трения за счет роста его деформационной составляющей, что иллюстрируется соответствующими графическими зависимостями. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии и внедрении процесса алмазного выглаживания в производство.

Список использованных источников

1. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностно-пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Бобровский, Н.М. Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей / Н.М. Бобровский. – Тольятти: Тольяттин. гос. ун-т, 2008. – 170 с.
3. Губанов, В.Ф. Выглаживание: качество, технологии, инструменты / В.Ф. Губанов. – М.: Изд. дом Акад. естествознания, 2013. – 70 с.
4. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностно-пластическим деформированием: справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
5. Чепя, П.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей / П.А. Чепя, В.А. Андриянин; под ред. О.В. Берестнева. – Минск: Наука и техника, 1988. – 192 с.
6. Гуров, Р.В. Методология проектирования операций отделочно-упрочняющей обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием / Р.В. Гуров // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2010. – №4 (28). – С. 17–23.
7. Блюменштейн, В.Ю. Исследование остаточных напряжений поверхностного слоя в процессах поверхностного пластического деформирования / В.Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – №3. – С. 41–48.
8. Мельников, П.А. Оптимизация параметров процесса выглаживания в производственных условиях с целью получения поверхности, пригодной для работы в условиях гидродинамического трения / П.А. Мельников, Н.М. Бобровский // Вектор науки ТГУ. – 2011. – №2 (16). – С. 65–67.
9. Титов, В.А. Повышение ресурса изделий из титановых сплавов методом алмазного выглаживания / В.А. Титов, А.В. Титов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2010. – №4. – С. 18–24.
10. Рязанова-Хитровская, Н.В. Некоторые пути повышения эффективности процесса алмазного выглаживания / Н.В. Рязанова-Хитровская, И.Н. Пыжов, Н.В. Крюкова // Високі технології в машинобудуванні. – 2015. – Вип. 1 (25). – С. 173–182.
11. Чепя, П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностно-пластическим деформированием / П.А. Чепя. – Минск: Наука и техника, 1981. – 128 с.
12. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностно-пластическим деформированием / Я.Н. Отений [и др.] // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исслед. Техн. науки. – 2016. – №12. – С. 452–455.
13. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
14. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
15. Михин, Н.М. Трение в условиях пластического контакта / Н.М. Михин. – М.: Наука, 1968. – 104 с.
16. Технологические особенности формирования параметров качества поверхностного слоя при алмазном выглаживании в условиях интегрированной обработки / В.Ю. Скиба [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – №3 (68). – С. 31–41.

References

1. Smelyanskii V. M. *Mechanics Hardening the Details of the Surface-Plastic Deformation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p. (in Russian).
2. Bobrovskii N. M. *Development of the Scientific Basis for the Processing of Parts by Surface-Plastic Deformation without the use of Lubricant-Coolants*. Togliatti, Togliatti State University, 2008. 170 p. (in Russian).
3. Gubanov V. F. *Smoothing: Quality, Technologies, Tools*. Moscow, Publ. House of the Academy of Natural Sciences, 2013. 70 p. (in Russian).
4. Odincov L. G. *Hardening and Finishing of Parts by Surface Plastic Deformation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p. (in Russian).
5. Chepa P. A., Andriyanin V. A. Berestnev O. V., ed. *Performance Properties of Hardened Parts*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988. 192 p. (in Russian).
6. Gurov R. V. Methodology of designing operations for finishing and hardening processing of machine parts by surface-plastic deformation. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Brest State Technical University], 2010, no. 4 (28), pp. 17–23 (in Russian).
7. Blumenstein V. Y., Makhlov M. S. Investigation of residual stresses of the surface layer in the processes of surface plastic deformation. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 3, pp. 41–48 (in Russian).
8. Mel'nikov P. A., Bobrovskii N. M. Optimization parameters of the smoothing process in production conditions in order to obtain a surface suitable for work in conditions of hydrodynamic friction. *Vektor nauki TGU* [Science Vector Togliatti State University], 2011, no. 2 (16), pp. 65–67 (in Russian).
9. Titov V. A., Titov A. V. Increasing the life of titanium alloy products by diamond smoothing. *Kuznechno-shtampovoychnoe proizvodstvo* [Forging and Stamping Production], 2010, no. 4, pp. 18–24 (in Russian).
10. Ryazanova-Khitrovskaya N. V., Pyzhov I. N., Kryukova N. V. Some ways to improve the efficiency of the diamond smoothing process. *Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni* [High-Technologies in Mechanical Engineering], 2015, issue 1 (25), pp. 173–182 (in Russian).
11. Chepa P. A. *Performance properties of hardened parts*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988. 192 p. (in Russian).
12. Otenii Y. N., Privalov N. I., Shchegolev N. G., Murav'ev O. P., Tkacheva Yu. O. Features of forming the depth of hardening when processing parts by surface-plastic deformation. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. Tekhnicheskie nauki* [International Journal of Applied and Fundamental Research. Technical Science], 2016, no. 12, pp. 452–455 (in Russian).
13. Torbilo V. M. *Diamond Smoothing*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 105 p. (in Russian).
14. Kragielskii I. V. *Friction and Wear*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p. (in Russian).
15. Mihin N. M. *Plastic Contact Friction*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 104 p. (in Russian).
16. Skiba Y. V., Pushnin V. N., Kornev D. Yu., Parts K. A. Technological features of the formation of surface layer quality parameters for diamond smoothing under integrated processing conditions. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Processing (Technology, Equipment, Tools)], 2015, no. 3 (68), pp. 31–41 (in Russian).

Информация об авторах

Домасевич Виталий Вячеславович – аспирант, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (пр. Октября, 48, 246746, Гомель, Республика Беларусь); инженер-конструктор бюро сталеплавленного производства управления проектирования и реконструкции, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (ул. Промышленная, 37, 247210, Жлобин, Гомельская обл., Республика Беларусь). E-mail: domasevich-v@yandex.ru

Ахметов Тимур Альфритович – начальник метизной лаборатории исследовательского центра, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (ул. Промышленная, 37, 247210, Жлобин, Гомельская обл., Республика Беларусь). E-mail: metiz.to@bmz.gomel.by

Кульгейко Михаил Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Графика», Белорусский государственный университет транспорта (ул. Кирова, 34, 246653, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: kulgeyko82@rambler.ru

Information about the authors

Vitaliy V. Domasevich – Graduate Student, P.O. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Octiabria Ave., 246746, Gomel, Republic of Belarus); Design Engineer Bureau of Steel Production, Management of Design and Reconstruction, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC” (37, Promyshlenaya Str., 247210, Zhlobin, Gomel Region, Republic of Belarus). E-mail: domasevich-v@yandex.ru

Timur A. Ahmetov – Head of the Hardware Laboratory of the Research Center, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC” (37, Promyshlenaya Str. 247210, Zhlobin, Gomel Region, Republic of Belarus). E-mail: metiz.to@bmz.gomel.by

Mikhail P. Kulgeyko – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department “Graphics”, Belarusian State University of Transport (34, Kirov Str., 246746, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: kulgeyko82@rambler.ru