

УДК 621.9.02

**В. Б. Левитан¹, С. Е. Бельский², М. Н. Пищов²,
А. В. Вергейчик², К. В. Пивоварчик²**

¹ЧУП «Сталекс»

²Белорусский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА

Разработка и внедрение в производство ресурсосберегающих технологических процессов изготовления инструментальной оснастки является одной из актуальных задач машиностроения.

Важным фактором повышения эффективности металлообрабатывающих процессов является улучшение использования дефицитных инструментальных материалов. Проанализированы существующие технологические процессы сварки и термической обработки комбинированного инструмента, рассмотрены особенности термической обработки стали Р6М5, используемой для изготовления режущей части.

Рассмотрено влияние технологии сварки и термической обработки комбинированного инструмента на прочность сварного шва. Приведены сведения о применяемой оснастке и схеме испытаний соединения в условиях изгиба. Изучены твердость и прочность образцов из быстрорежущей и конструкционных частей инструмента при различных схемах нагрева в условиях сварки трением и плавлением.

На основании анализа большого объема экспериментального материала показано, что наибольшая прочность сварного шва достигается при использовании конструктивной части из стали 40Х и сварке трением при нагреве обеих частей инструмента с переходом сварного шва на диаметр образца, а также при нагреве только быстрорежущей части с переходом шва на диаметр.

Ключевые слова: сварка, инструмент, быстрорежущая сталь, прочность, твердость, термическая обработка.

**V. B. Levitan¹, S. Ye. Belsky², M. N. Pishchov²,
A. V. Vergeichik², K. V. Pivavarchyk²**

¹Private enterprise “Staleks”

²Belarusian State Technological University

RESEARCH OF STRENGTH OF WELDED COMPOUNDS OF COMBINED TOOL

The development and the introduction of resource-saving technological processes of tool equipment production are ones of the crucial tasks of mechanical engineering.

An important factor in improving efficiency of metal-working processes is the improvement of utilization of scarce tool materials. The existing technological processes of welding and heat treatment of the combined tool are analyzed, the features of heat treatment of steel RBM5 used for the cutting part production are considered.

The impact of welding technology and heat treatment of the combined tool on the weld strength is considered. Information is given for the used equipment and the test scheme of the joint under bending conditions. The hardness and the strength of samples from high-speed and structural parts of the tool were studied under various heating schemes in conditions of friction and melting.

Based on the analysis of a large volume of experimental material, it is shown that the maximum weld strength is achieved by using a structural part of steel 40X and friction welding by heating both parts of the tool with the weld transition to the sample diameter, as well as by heating only the high-speed part with the weld transition to diameter.

Key words: welding, tool, high-speed steel, strength, hardness, heat treatment.

Введение. Разработка и практическая реализация процессов изготовления деталей машин и технологической оснастки при обеспечении их высокого качества является одной из наиболее актуальных задач промышленности. Важным фактором повышения эффективности

металлообработки является совершенствование изготовления инструмента из дорогих и дефицитных инструментальных сталей. Получение высокой надежности и долговечности инструмента в условиях интенсификации производства и повышения требований к качеству полу-

чаемых заготовок возможно в результате тщательной отработки конструкции и создания эффективной технологии изготовления инструмента.

В связи с этим актуальна задача совершенствования комбинированного инструмента, составляемого из режущей и конструкционной частей. Обеспечение прочности сварного соединения во многом определяет его надежность и долговечность, что весьма важно для производства, поскольку доля простоев высокопроизводительного оборудования из-за замены или наладки инструмента составляет 20–25%.

Различные исследования по-разному трактуют особенности термической обработки сварного шва [1–8]. Актуальной проблемой является задача выбора технологии термической обработки сварного шва.

Основная часть. В работе исследовали пределы прочности при изгибе на сварных образцах из быстрорежущей и конструкционной частей, прошедших различную термическую обработку. Для материала конструкционной части были использованы стали 40X либо 45. Быстрорежущая часть изготавливалась из стали P6M5. Выбор данной стали обусловлен благоприятным сочетанием легирующих элементов, благодаря чему в термообработанном состоянии она имеет структуру мартенсита и мелкодисперсных карбидов, обеспечивающих высокую теплостойкость, твердость и прочность. При этом вязкость данной стали превышает значения, полученные для таких сталей, как P12 и P18 [9].

Однако для вольфрамомолибденовых сталей характерны некоторые особенности термообработки, которые необходимо учитывать при изготовлении комбинированного инструмента. Для стали типа P6M5 характерен рост аустенитного зерна при нагреве даже с незначительным превышением температур нагрева под закалку [10]. С другой стороны, снижение температур уменьшает легированность твердого раствора, что ведет к ухудшению режущих свойств инструмента [11–14]. Значительную роль в обеспечении комплекса свойств данной стали играет также температура и кратность отпусков. В некоторых случаях рекомендуется проводить первый отпуск при температуре 350°C, что обеспечивает повышение твердости и вязкости [10], а также проводить двукратный отпуск вместо трехкратного [14, 16].

В работе приводятся результаты определения предела прочности при изгибе на сварных образцах из быстрорежущей и конструкционной стали, прошедших различную термическую обработку. Диаметр образцов для испытаний

составлял 16 мм, длина каждой части – 80 мм. Образцы сваривали двумя видами сварки – трением и оплавлением.

После сварки образцы подвергали изотермическому отжигу по двум вариантам.

1 вариант. Нагрев до 860°C, выдержка 4 ч, затем охлаждение с печью до 750°C, выдержка 4 ч, а затем охлаждение в течение 16 ч до 500°C и далее на воздухе.

2 вариант. Нагрев образцов до 860°C, выдержка 2 ч, затем охлаждение с печью до 720°C, выдержка 4 ч, охлаждение с печью в течение 4 ч и далее на воздухе.

На отожженных образцах снимали грат и производили токарную обработку до диаметра 10,8 мм. После этого производили термическую обработку. Вначале закаливали в масле быстрорежущую часть сварного образца по режиму: подогрев 850°C, окончательный нагрев 1220°C. Предварительный нагрев производили в хлорнатриевой ванне, а окончательный – в хлорбариевой. После закалки быстрорежущей части производили трехкратный отпуск при температуре 560°C по 1 ч. Затем выполняли закалку конструкционной части сваренных образцов. Сталь 40X закаливали в масле при температуре 860°C, а сталь 45 после нагрева ТВЧ – при температуре 830–850°C на воду. Сталь 40X отпускали в электропечи при температуре 250°C в течение 2 ч, сталь 45 – в электропечи при температуре 150°C в течение 2 ч.

После выполнения полного цикла термической обработки образцы шлифовали до диаметра 10 мм на бесцентровочно-шлифовальном станке. Испытания механических свойств образцов проводили на десятитонной машине Амслера.

Нагрузку на сварной шов образца передавали через пуансон с радиусом при вершине 20 мм. В качестве опор использовали круглые ролики диаметром 30 мм (рис. 1)

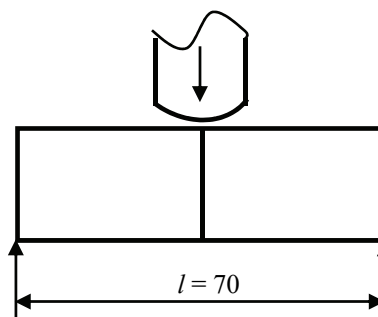


Рис. 1. Схема испытаний на изгиб сварных образцов

Сварной образец устанавливали таким образом, чтобы плоскость сварного шва совпадала с осью приложения нагрузки.

Таблица 1

Прочности режущей и конструкционной частей

Номер образца	Сталь	Разрушающая нагрузка P , Н	$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	Вид термической обработки
30	P6M5	19 500	337	Закалка 1220°C + отпуск 560°C, 3 раза по 1 ч
29	P6M5	18 500	318	
55	P6M5	21 500	371	
17	P6M5	18 000	311	
53	40X	–	469	Закалка 860°C, масло + отпуск 250°C, 2 ч
52	40X	–	446	
54	40X	–	458	
43	40X	–	413	

Предел прочности при изгибе определяли по формуле

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{max}}}{W};$$

$$M_{\text{max}} = \frac{P \cdot l}{4},$$

где P – нагрузка, Н; l – расстояние между опорами, мм.

Момент сопротивления W для круглого сечения определяется по формуле

$$W = \frac{\pi d^3}{32},$$

где d – диаметр образца, мм.

Для межцентрового расстояния между опорами $l = 70$ предел прочности при изгибе определяется по формуле

$$\sigma = \frac{P \cdot 1783,4}{d^3}.$$

Разрушение всех сварных образцов происходило в зоне сварного шва по быстрорежущей стали.

Половинки сварных образцов испытывали на изгиб для определения истинной прочности стали вне зоны сварного шва. При испытании на изгиб образцов из стали 40X расстояние между опорами было равным 50 мм.

Результаты испытаний приводятся в табл. 1

Для приготовления микрошлифов использовали половинку сварного образца из конструкционной стали, т. к. на ней остается еще часть быстрорежущей и можно изучать как структуру сварного шва, так и структуру прилегающих ко шву сталей – быстрорежущей и конструктивной (рис. 2).

На половинках поломанных образцов измерили с поверхности твердость по Роквеллу по направлению от излома к противоположному концу образца. Расстояние между уколами алмазного индентора составляло 3 мм.

Приготовление микрошлифов производили в центральной части разрушенного образца в плоскости, проходящей через его продольную ось (рис. 2)

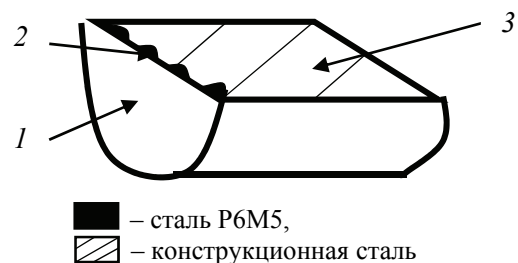


Рис. 2. Схема приготовления микрошлифа для исследования микроструктуры и микротвердости:
1 – излом; 2 – линия шва;
3 – плоскость шлифа

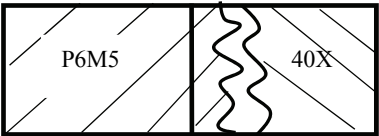
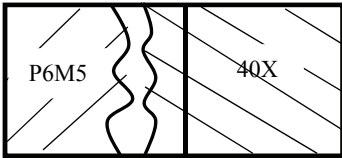
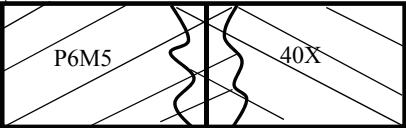
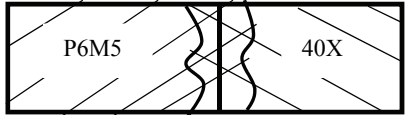
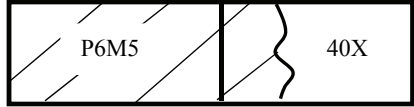
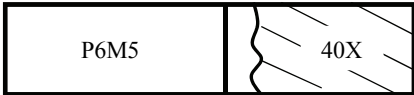

Для разработки оптимальной технологии нагрева при закалке сварных образцов использованы различные схемы граничного нагрева частей инструмента (табл. 2).

Таблица 2

Схема нагрева сварного образца под закалку

Номер образца	Схемы
1	<p>Нагрев быстрорежущей и конструкционной части производится не доходя до шва на величину диаметра образца</p>
2	<p>Образцы после отжига, без последующей термообработки</p>

Окончание табл. 2

Номер образца	Схемы
3	 <p data-bbox="288 472 761 591">Нагрев быстрорежущей стали с переходом шва на величину диаметра образца, а конструкционной – не доходя шва по диаметру</p>
4	 <p data-bbox="288 770 761 889">Быстрорежущая часть нагревается, не доходя шва на диаметр, а конструкционная нагревается с переходом шва на диаметр</p>
5	 <p data-bbox="288 1032 761 1122">Быстрорежущая и конструкционная части нагреваются с переходом сварного шва на диаметр образца</p>
6	 <p data-bbox="288 1247 761 1335">То же, что и 5 вариант, но конструкционная часть закалена без последующего отпуска</p>
7	 <p data-bbox="288 1458 761 1541">Нагрев быстрорежущей части с переходом со шва на диаметр. Конструкционная часть в отожженном состоянии</p>
8	 <p data-bbox="288 1648 761 1742">Быстрорежущая часть после отжига, конструкционная нагрета не доходя шва на величину диаметра</p>
9	 <p data-bbox="288 1868 761 1955">Быстрорежущая часть после отжига, конструкционная нагрета с переходом сварного шва на диаметр</p>

После термообработки проведены испытания сварного шва по каждому варианту с опре-

делением разрушающей нагрузки, прочности и твердости обеих частей инструмента.

При обработке по первому варианту прочность шва составляла 110–130 МПа при твердости быстрорежущей стали в зоне шва 30–45 HRC. На конструкционной стали, прилегающей к зоне шва, преобладала структура феррита, а на быстрорежущей стали – сорбитообразного перлита с мелкими карбидами. При отсутствии термической обработки (вариант 2) прочность шва также составляла 110–130 МПа, однако твердость быстрорежущей стали была очень низкой (18–20 HRC). Проведение закалки с нагревом быстрорежущей части с переходом шва на величину диаметра образца (вариант 3) обеспечивает необходимую для работы инструмента твердость быстрорежущей стали (60–62 HRC). Прочность шва зависит от материала конструкционной части и при использовании стали 45 составляет 100–120 МПа, а при использовании стали 40X и сварке плавлением составляет 120–140 МПа, а при сварке трением – 180–190 МПа. Такое различие может быть объяснено тем, что при сварке плавлением в большей мере окисляется зона расплава и имеет место ледебуритная эвтектика на быстрорежущей стали в зоне сварного шва.

При проведении термической обработки шва при использовании стали 40 X и сварке трением прочность шва несколько ниже, чем по предыдущему варианту (160–180 МПа) и, естественно, значительно ниже твердость быстрорежущей части в зоне шва (38–40 HRC). Следует отметить уменьшение обезуглероживания части шва со стороны конструкционной стали и повышение ее твердости в зоне шва до 25–40 HRC (по сравнению 15–20 HRC по предыдущему варианту). С нагревом быстрорежущей и конструкционной части с переходом сварного шва на диаметр образца (вариант 5) прочность шва при использовании сварки трением составляет 160–170 МПа, а твердость быстрорежущей стали соответствует обычной термообработке (61–62 HRC). При этом значительно возрастает твердость части инструмента из стали 40X (до 40–50 HRC), отсутствие отпуска после закалки способствует обеспечению твердости стали 40X до 52–55 HRC при такой прочности шва, как и в предыдущем варианте. Наилучшие результаты по прочности соединения (180–190 МПа) достигаются при нагреве быстрорежущей части с переходом шва на диаметр (вариант 7). Однако очень низкая твердость конструкционной части может вызвать проблемы с последующей эксплуатацией инструмента. Варианты 8, 9, не предусматривающие термической обработки быстрорежущей стали, неприемлемы вследствие ее низкой твердости. Прочность шва составляет в этих случаях 130–160 МПа.

Заключение. Представленными результатами проведенных исследований установлено, что предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ для быстрорежущей части комбинированного инструмента составляет 310–360 МПа, а для части из стали 40Х – 410–460 МПа. Исследование прочности шва показало, что она примерно в два раза ниже прочности отдельных частей инструмента.

Прочность сварного шва при использовании для изготовления конструктивной части стали 40Х значительно выше, чем при применении стали 45. Также показано преимущество сварки трением по сравнению со сваркой плавлением.

Термическая обработка сварного шва обязательно должна выполняться с перекрытием его хотя бы на диаметр образца. Наибольшая прочность сварного шва достигается при использовании стали 40Х и сварке трением при нагреве обеих частей инструмента с переходом сварного шва на диаметр образца, а также при нагреве только быстрорежущей части с переходом шва на диаметр. Конструкционная часть в этом случае остается в отожженном состоянии.

При использовании подобных схем предел прочности шва на изгиб $\sigma_{изг}$ составляет порядка 150–180 МПа, а твердость быстрорежущей части – 60–62 HRC.

Список литературы

1. Евтюшкин Ю. А., Егоров В. И., Репин А. В. Рекомендуются режимы сварки трением концевой инструмента из вольфрамомолибденовой стали Р6М5 с конструкционной сталью 45 на П/Автомате МОД МФ-327 // Известия Томского политехнического института имени С. М. Кирова. Т. 241. 1975. С. 86–89.
2. Мильюкова А. М. Структурно-фазовый состав сталей Р6М5 и 40Х после совместной термической обработки // Литье и металлургия. 2013. С. 97–103.
3. Гуревич Ю. Г., Шпак А. Т., Савиных Л. М. Математическое моделирование процесса сварки трением порошковой быстрорежущей стали с конструкционной // Вестник КГУ. 2005. № 2. С. 57–60.
4. Влияние основных параметров процесса сварки трением с перемешиванием на дефектность структуры сварного соединения / О. В. Сизова [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 4 (77). С. 19–29.
5. Виль В. И. Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970. 176 с.
6. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Л.: Машиностроение, 1973. 199 с.
7. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме. Л.: Машиностроение, 1976. 312 с.
8. Хараев Ю. П. Термоциклическая закалка литой быстрорежущей стали // Ползуновский альманах. 2004. № 4. С. 54–55.
9. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975. 581 с.
10. Александров Б. Л. Особенности термической обработки быстрорежущей стали Р6М5 // Металловедение и термическая обработка материалов. 1973. № 11. С. 15–17.
11. Особенности горячей обработки стали Р6М5 / А. М. Адашкин [и др.] // Стали и инструменты. 1973. № 7. С. 31–33.
12. Смольников Е. А. Опыт термической обработки быстрорежущих сталей Р6М5, Р6М5К5, Р9М4К8. Металлорежущий и контрольно измерительный инструмент // Экспресс-информация ВИНТИ М. 1976. Вып. 5. С. 3–9.
13. Адашкин А. М., Анджюс П. А., Бузелис В. И. Причины нестабильности свойств стали Р6М5 // Сталь. 1975. № 7. С. 649–651.
14. Васильев Н. В. Некоторые особенности в микроструктуре режущего инструмента из стали Р6М5 // Пути повышения качества металлорежущего инструмента. 1974. С. 158–161.
15. Бельский С. Е., Тофпенев Р. Л. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. Минск: Наука и техника, 1984. 127 с.
16. О двукратном отпуске быстрорежущей стали / В. К. Заблоцкий [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 1973. № 3. С. 54–55.

References

1. Evtuyushkin Yu. A., Egorov V. I., Repin A. V. Recommended friction welding of the end tool made of P6M5 tungsten-molybdenum steel with structural steel 45 at the P/Avtomat MOD MF-327. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta imeni S. M. Kirova* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute named after S. M. Kirov], 1975. Vol. 241, pp. 86–89 (In Russian).
2. Milyukova A. M. Structural-phase composition of R6M5 and 40X steels after joint heat treatment. *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and Metallurgy], 2013, pp. 97–103 (In Russian).
3. Gurevich Yu. G., Shpak A. T., Savinykh L. M. Mathematical modeling of the friction welding of the powder quick-steel steel from structural. *Vestnik KSU* [Bulletin of KSU], 2005, no. 2, pp. 57–60 (In Russian).

4. Sizova O. V., Kolubaev A. V., Kolubaev E. A., Zaikina A. A., Rubtsov V. E. The influence of the main parameters of the friction stir welding process on the defective structure of the welded joint. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)* [Metal processing (technology, equipment, tools)], 2017, no. 4 (77), pp. 19–29 (In Russian).
5. Vill' V. I. *Svarka metallov treniyem* [Welding of metals by friction]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1970. 176 p.
6. Erokhin A. A. *Osnovy svarki plavleniyem* [Fundamentals of fusion welding]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1973. 199 p.
7. Kazakov N. F. *Diffuzionnaya svarka v vakuume* [Diffusion welding in vacuum]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1976. 312 p.
8. Kharaev Yu. P. Thermocyclic hardening of cast high-speed steel. *Polzunovskiy al'manakh* [Polzunovsky almanac], 2004, no. 4, pp. 54–55 (In Russian).
9. Geller Yu. A. *Instrumental'nyye stali* [Tool steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 581 p.
10. Alexandrov B. L. Features of the heat treatment of high-speed steel R6M5. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka materialov* [Metallurgy and heat treatment of materials], 1973, no. 11, pp. 15–17 (In Russian).
11. Adaskin A. M., Andjus P. A., Buzelis V. I., Makhmudov A. B. Features of hot processing of steel P6M5. *Stali i instrumenty* [Steel and tools], 1973, no. 7, pp. 31–33 (In Russian).
12. Smolnikov E. A. Experience in the heat treatment of high-speed steels R6M5, R6M5K5, R9M4K8. Metal-cutting and measuring instrument. *Ekspress informatsiya VINITI M* [Express information VINITI M], 1976, no. 5, pp. 3–9 (In Russian).
13. Adaskin A. M., Andjus P. A., Buzelis V. I. Causes of instability of the properties of steel P6M5. *Stal'* [Steel], 1975, no. 7, pp. 649–651 (In Russian).
14. Vasiliev N. V. Some features in the microstructure of cutting tools made of P6M5 steel. *Puti povysheniya kachestva metallovezhushchego instrumenta* [Ways to improve the quality of metal cutting tools], 1974, pp. 158–161 (In Russian).
15. Belsky S. E., Tofpenets R. L. *Strukturnyye faktory ekspluatatsionnoy stoykosti rezhushchego instrumenta* [Structural factors of the operational resistance of the cutting tool]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1984. 127 p.
16. Zablotsky V. K., Bruchilovsky B. A., Zubov E. S. On the double tempering of high-speed steel. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka materialov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 1973, no. 3, pp. 54–55 (In Russian).

Информация об авторах

Левитан Владислав Борисович – инженер-металлург. ЧУП «Сталекс» (220021, г. Минск, пер. Бехтерева, 10, Республика Беларусь). E-mail: vladmet@tut.by

Бельский Сергей Евграфович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmiputu@belstu.by

Пищов Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Pishchou@belstu.by

Вергейчик Алексей Викторович – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmiputu@belstu.by

Пивоварчик Карина Васильевна – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmiputu@belstu.by

Information about the authors

Levitan Vladislav Borisovich – metallurgical engineer. Private enterprise “Staleks” (10, Bekhtereva Lane, 220021, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vladmet@tut.by

Belsky Sergey Yefgrafovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dmiputu@belstu.by

Pishchov Mikhail Nikolayevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Pishchou@belstu.by

Vergeichik Aleksey Viktorovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: dmiputu@belstu.by

Pivavarchyk Karina Vasilievna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: dmiputu@belstu.by

Поступила 11.03.2020