

УДК 621.923

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПІД ЧАС ОБРОБЛЕННЯ РІЗАННЯМ НАПЛАВЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

*В. В. КОЛОМІЄЦЬ, Р. В. АНТОЩЕНКОВ, І. А. ФАБРИЧНИКОВА,
С. А. БОГДАНОВИЧ, І. В. ГАЛИЧ*

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. Петра Василенко*

Досліджено фізико-механічні параметри під час точіння наплавлених покриттів інструментами із надтвердого матеріалу на основі нітриду бору (гексаніту-Р). Встановлено, що під час точіння інструментом із гексаніту-Р усадка стружки, кути зсуву і довжина контакту стружки із передньою поверхнею інструмента мають невисокі значення. Малі коефіцієнти тертя і сили різання під час обробки наплавлених матеріалів забезпечують підвищену стійкість інструментів із гексаніту-Р, а високі температури дають змогу ними обробляти наплавлені матеріали на великих швидкостях.

Ключові слова: *фізико-механічні параметри, наплавлені матеріали, гексаніт-Р.*

Physicomechanical parameters under turning of deposited coatings with tools of super-hard material based on boron nitride (hexanite-R) are investigated. It is established that during turning with hexanite-P cutters, the values of chip shrinkage, shear angles and length of the chip contact with the front surface of the cutters are small. Small values of friction coefficients and cutting forces during processing of the deposited materials provide high resistance of the hexanite-R cutters. High temperatures allow us to process the weld materials at high cutting speeds.

Keywords: *physicomechanical parameters, weld material, hexanite-R.*

Вступ. До фізико-механічних параметрів під час оброблення різанням, згідно з класичною теорією, належать стружкоутворення, тертя, сили різання і температура в зоні контакту. Щоб охарактеризувати властивості нових надтвердих інструментальних матеріалів, необхідно встановити їх зміни під час обробки.

Встановлено, що під час руйнування шару попереду інструмента постійно утворюється випереджальна тріщина. Уздовж початкової ламаної лінії відбуваються перші зрушення часточок матеріалу, які утворюють в підсумку елементну стружку [1].

Одним із важливих характеристик утворення стружки є кути зсуву, за якими можна судити про ступінь деформації шару [2], а також довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструмента. Через неоднорідність наплавленого шару і утворення під час його руйнування елементної стружки в зоні різання виникають малі довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструмента. Це призводить до великих питомих тисків на його передній поверхні та її прискореного зносу.

Фізичні характеристики взаємодії інструментального і оброблюваного матеріалів залежать від пружних і пластичних деформацій шарів останнього. Змінюючи тертя, можна керувати обробкою, а отже, і якістю обробленої поверхні та стійкістю інструмента.

Вирішенню цього завдання перешкоджає недостатня вивченість особливостей тертя надтвердих інструментальних і наплавлених основних матеріалів. Об-

роблення матеріалів, наплавлених порошковими дротами, характеризується різноманітними дефектами шару, які призводять до коливальної зміни сили і температури обробки.

Матеріали і методи досліджень. Для досліджень обрали матеріал, наплавлений порошковим самозахисним дротом ПП-Нп-10Х14Т. Під час обробки в лабораторних умовах використовували зразки $\varnothing 50$ і завдовжки 150 mm зі сталі 40Х.

Деталі тракторів Т-150 і Т-40 (зношені шийки під підшипники валів, кронштейни, кардани і гальмівні барабани) наплавляли за оптимальними режимами у виробничих умовах ремонтних підприємств.

Неоднорідність наплавлених шарів визначали за методикою [3] і встановили, що під час обробки порошковим дротом ПП-Нп-10Х14Т коефіцієнт неоднорідності шару 4,8. Мікроструктуру наплавлених шарів оцінювали за глибиною наплавленого шару. Під час наплавлення порошковим дротом ПП-Нп-10Х14Т вона складається із зерен трооститу, оточених тонкими феритними сегментами. Вузька перехідна зона має мартенситну структуру. Структура основного наплавленого металу трооститно-сорбітна з мікротвердістю $H_{100} = 3140...3750$, мікротвердість наплавленого металу $H_{100} = 3760...4090$, а перехідної зони $H_{100} = 6350...6570$. У зоні кристалізації присаджувального металу спостерігали дрібнодисперсні включення титану і глобулярні силікату (рис. 1).

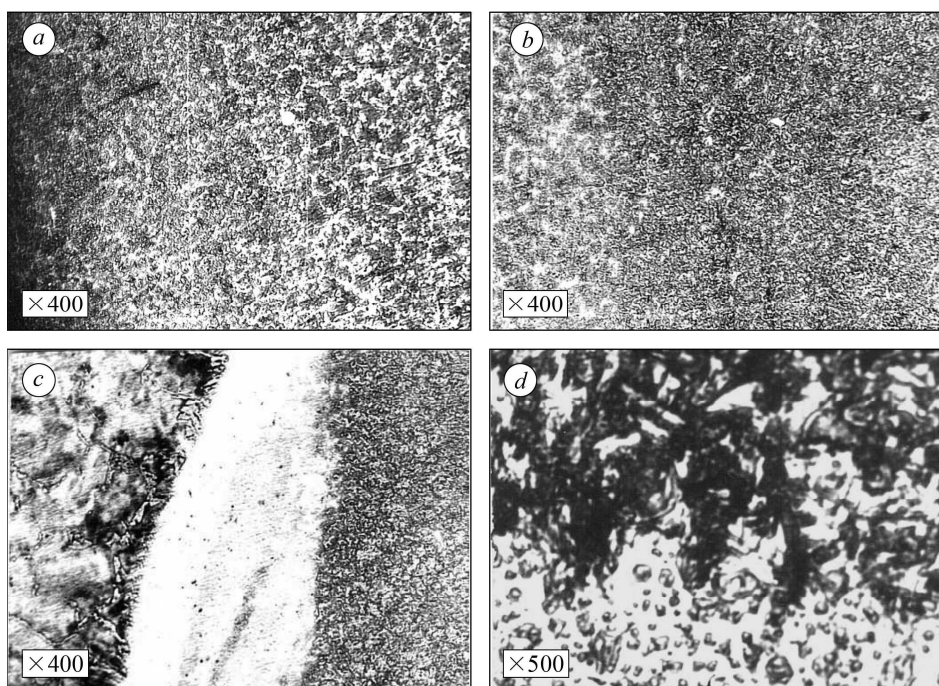


Рис. 1. Мікроструктура наплавленого шару порошковим самозахисним дротом ПП-Нп-10Х14Т: *a, b* – в зоні кристалізації присаджувального матеріалу; *c, d* – перехідної зони.

Fig. 1. Microstructure of the deposited layer by powder protective wire ПП-Нп-10Х14Т: *a, b* – in zone of crystallization of adding material; *c, d* – transition zone.

Фізико-механічні параметри визначали посередині наплавленого шару після чорнової обробки. Вплив мікроструктури наплавленого шару враховували під час визначення характеристик стружкоутворення і динаміки руйнування шару. Лабораторні дослідження виконували на токарному модернізованому верстаті 1Е61МФ2 з двигуном постійного струму, що давало можливість плавно (безсту-

пінчато) змінювати частоту обертання зразка, а триразовим зменшенням подач домогтися низької шорсткості за чистої обробки наплавлених матеріалів. Знос робочих поверхонь інструмента визначали безпосередньо на верстаті за допомогою розробленого і виготовленого приладу з оптичною системою МИР-2 та МОВ 1,5×15 з ціною поділки 1,6 μm з можливістю наведення оптичної осі приладу на будь-яку його частину для необхідного збільшення. Під час досліджень визначали характер зношування гексаніту-Р за допомогою електронного мікроскопа ЕМ-5 [4]. Воно відбувається у вигляді виділення найдрібніших гострих блоків гексаніту-Р, які не втрачають своїх властивостей (рис. 2).

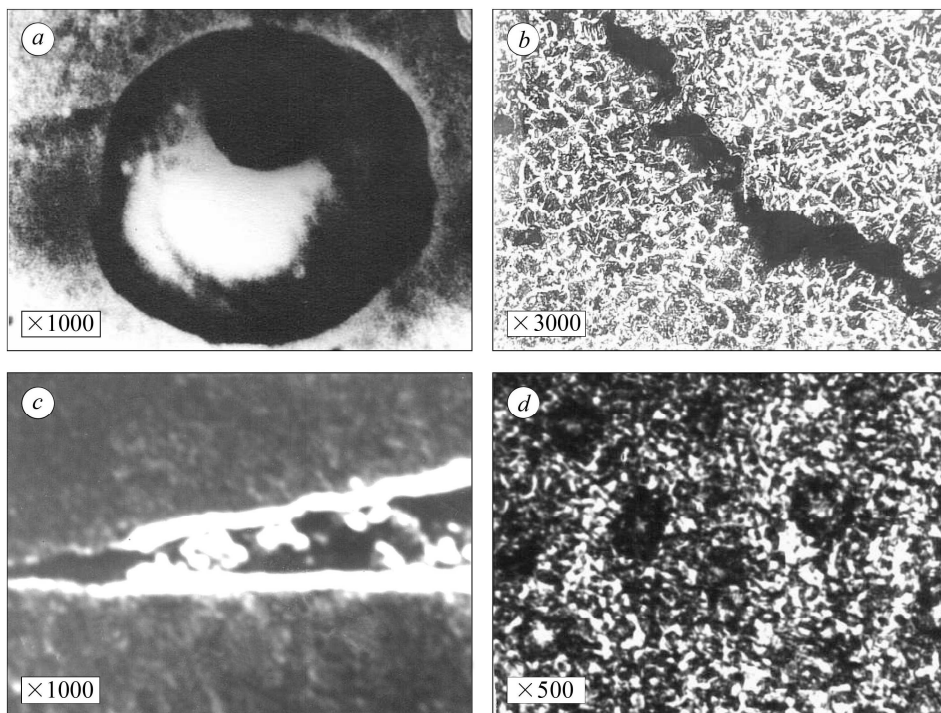


Рис. 2. Види дефектів наплавлених шарів:
a – пора; *b* – тріщина; *c* – каверна; *d* – включення.

Fig. 2. Types of defects of the deposited layers: *a* – pore; *b* – cracks; *c* – cavity; *d* – inclusion.

Результати та їх обговорення. Через неоднорідність матеріалу, наплавленого порошковим дротом, під час обробки інструментом із гексаніту-Р поверхневий шар руйнується з утворенням елементної стружки.

Усадка елементної стружки є універсальною характеристикою ступеня деформації шару, який видаляється. Встановлено, що з підвищенням швидкості точіння наплавлених матеріалів усадка стружки змінюється несуттєво. Це пояснюється різними видами дефектів у наплавленому матеріалі.

Характер зміни усадки стружки зі збільшенням швидкості точіння всіх покриттів приблизно однаковий, але відрізняється вона за значеннями. За усадкою стружки (ζ) і переднім кутом інструмента (γ) розрахований кут зсуву стружки (Φ) за залежністю $\Phi = \cos \gamma / (\zeta - \sin \gamma)$.

Кут зсуву повністю залежить від усадки стружки і копіює її зміну від технологічних параметрів обробки (рис. 3). Малі значення усадки стружки та невеликі зміни кутів зсуву призводять і до малих довжин контакту стружки з передньою поверхнею інструмента. Цю довжину визначали залежно від товщини видаленого

шару (a), кута зсуву стружки (Φ) і переднього кута інструмента (γ) за такою залежністю:

$$l = a \cdot \sin(\Phi + \gamma) / \sin \Phi.$$

Дослідні значення характеристик стружкоутворення дроту ПП-Нп-10Х14Т такі: оптимальна швидкість – 2 м/с; усадка стружки – $\zeta = 1,5$; кут зсуву – 29° ; довжина контакту стружки – 0,09 мм (при $S = 0,1$ мм/рот; $t = 0,3$ мм; $h_z = 0,1$ мм; $\gamma = -10^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\varphi = 40^\circ$; $\varphi_1 = 20^\circ$).

Таким чином, встановлено, що під час точіння покриттів, наплавлених порошковими дротами інструментом з гексаніту-Р, характеристики стружкоутворення мають малі значення і не впливають суттєво на обробку.

Експериментально тертя моделювали на установці з використанням пари тертя індентор з інструментального матеріалу–циліндричний зразок з оброблюваного матеріалу. Індентор з робочою поверхнею 0,2×4 мм виготовили з надтвердого матеріалу на основі нітриду бору типу гексаніт-Р, циліндричний зразок – з матеріалу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-10Х14Т. Індентор розмістили в динамометрі УДМ-100 та переміщували за заданого навантаження з подачею 0,1 мм/рот вздовж твірної циліндричного зразка. Коефіцієнт тертя розраховували зі співвідношення $\mu = F_w / N$, де F_w – сила тертя; N – сила нормального тиску (складова P_y). За значенням сили N визначали контактний тиск $q = N / f$, де f – площа контакту пари тертя [5].

Під час обробки наплавлених покриттів інструментами з надтвердих матеріалів змащувально-охолоджувальні рідини (ЗОР) застосовують нечасто та вони замінюють шліфування [6]. Щоб підвищити довговічність інструментів з надтвердих матеріалів на основі нітриду бору, розробляють тверді покриття [7]. Застосування ЗОР суттєво впливає на коефіцієнт тертя, силу та якість обробки [8–12], враховуючи окрихчувальну дію цих середовищ на стружкоутворення [13–15].

Поверхнями тертя під час руйнування наплавленого шару є поверхні контакту інструмента та оброблюваного матеріалу. У зоні контакту інструмент зношується на передній поверхні (мала довжина контакту стружки (l)) і на задніх поверхнях (ширина зносу (h_z)) через великі змінні питомі тиски. Під час дослідження впливу тертя на зношування інструмента головною характеристикою є його коефіцієнти. Встановлено, що малі коефіцієнти тертя гексаніту-Р з оброблюваними матеріалами не призводять до швидкого зносу інструмента. Під час руйнування неоднорідних і дефектних шарів наплавленого матеріалу утворюється елементна стружка з яскраво вираженими складовими.

Відомо, що гексаніт-Р, як і всі надтверді матеріали на основі нітриду бору та алмазу, має малу границю міцності на згин – в 2,5–3 рази меншу, ніж в інструментальних сталях. Тому передній кут у цих матеріалів виконують від'ємним, що призводить до утворення тупого кута при вершині інструмента, і так він працює на стиск. Висока твердість гексаніту-Р (в 5–6 разів більша, ніж у твердих сплавів) забезпечує підвищену стійкість під час руйнування неоднорідних наплавлених шарів. На рис. 3а показано вплив швидкості обробки на кут зсуву (крива 1) та усадку стружки (крива 2).

Вплив швидкості тертя-ковзання на коефіцієнт тертя гексаніту-Р з наплавленим матеріалом показав (рис. 3б, крива 2), що він зменшується зі збільшенням швидкості. Коефіцієнт тертя суттєво залежить від питомого тиску, зі збільшенням якого підвищується температура в зоні контакту, що змінює характер взаємодії контактуючих пар. Так, зі збільшенням питомого тиску коефіцієнт тертя спочатку зменшується, що пов'язано зі зниженням температури контакту, а потім зростає, що пов'язано зі збільшенням площі контакту (рис. 3б, крива 1).

Сили різання визначали на універсальній установці тертя, але замість індентора встановили інструмент. Відомо, що під час обробки неоднорідних наплавлених

матеріалів тангенціальна складова сили P_Z є змінною і лише в початковий період зношування інструмента може бути більше радіальної складової P_y . Загальну залежність сили обробки P можна виразити так:

$$P = C_p \cdot S \cdot t \cdot H + K_p \cdot \ell_K \cdot h_Z, \text{ N.}$$

Тут перший доданок визначає сили, які діють на передній поверхні, а другий – сили, які діють на задніх поверхнях інструмента. Сталій коефіцієнт C_p залежить від виду оброблюваного наплавленого матеріалу, а сталій коефіцієнт K_p – від стійкості інструмента і температури в зоні обробки. За незначної зміни подачі, глибини обробки і твердості оброблюваного матеріалу всі величини, які визначають сили обробки, можна приймати в першому ступені.

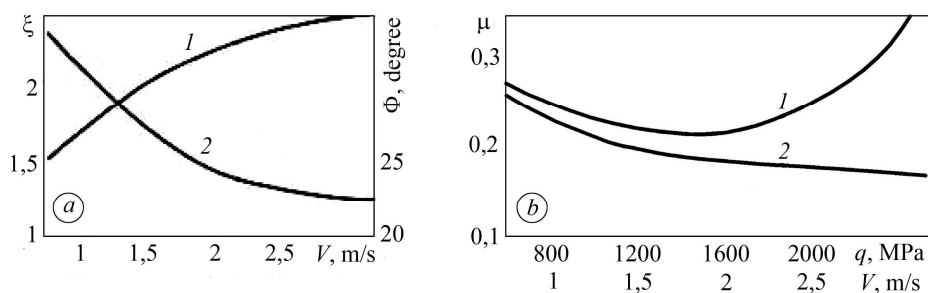


Рис. 3. Вплив швидкості обробки на кут зсуву (1) і усадку стружки (2) (а) та на коефіцієнт тертя (b, крива 2), а також питомого тиску на нього (b, крива 1):
 $S = 0,1 \text{ mm/rot}$; $t = 0,3 \text{ mm}$; $h_Z = 0,1 \text{ mm}$.

Fig. 3. Effect of processing velocity on shear angle (1) and chip shrinkage (2) (a) and on the friction coefficient (b, curve 2), and also of specific pressure on the friction coefficient (b, curve 1):
 $S = 0.1 \text{ mm/rot}$; $t = 0.3 \text{ mm}$; $h_Z = 0.1 \text{ mm}$.

Складова сили P_Z зі збільшенням швидкості обробки за чистового точіння матеріалу, наплавленого порошковим дротом, стало знижується, що пояснюємо контактними процесами, тобто зменшенням усадки стружки і коефіцієнта тертя (рис. 4, крива 2). Таким чином, можна стверджувати, що за тонкого точіння покриття, наплавленого порошковим дротом, складові сили обробки мають малі значення і впливають несуттєво на знос інструментів з гексаніту-Р.

Експериментальне визначення температури під час точіння наплавленого матеріалу здійснювали хромель-алюмелевою термопарою з товщиною дротів 0,2 mm, вбудованих в отвір заготовки з гексаніту-Р. Електрорушійну силу термопарі встановлювали компенсаційним підсилювачем постійного струму Ф359 та реєстрували двокоординатним міліамперметром Н359, що дає змогу отримувати шкалу температур з точністю 0,5°.

Рис. 4. Вплив швидкості обробки на тангенціальну силу P_Z (2) і температуру $Q^\circ\text{C}$ (1): за подачі $S = 0,1 \text{ mm/rot}$; глибини обробки $t = 0,3 \text{ mm}$ та зношування інструмента $h_Z = 0,1 \text{ mm}$.

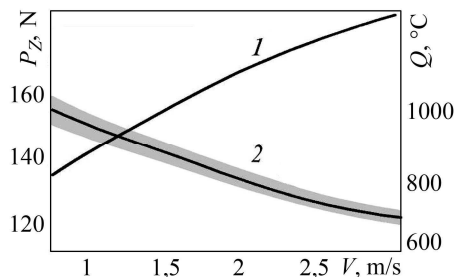


Fig. 4. Effect of processing speed on tangential force P_Z (2), and temperature $Q^\circ\text{C}$ (1): feed $S = 0.1 \text{ mm/rot}$; depth of processing $t = 0.3 \text{ mm}$ and tool wear $h_Z = 0.1 \text{ mm}$.

Встановлено, що за чистового точіння наплавленого матеріалу інструментом з гексаніту-Р вплив технологічних режимів процесу і геометричних параметрів

інструмента на температуру обробки підпорядковується загальним закономірностям процесу різання (рис. 4, крива *I*) – збільшення швидкості за чистової оброблення призводить до сталого зростання її температури.

ВИСНОВКИ

Малі значення усадки стружки, кута зсуву і довжини контакту стружки із передньою поверхнею інструмента з гексаніту-Р за чистового точіння покриття, наплавленого порошковим дротом, зумовлюють його підвищену працездатність. Малі коефіцієнти тертя і сили різання під час обробки наплавленого матеріалу забезпечують високу стійкість інструмента з гексаніту-Р. Високі температури дають можливість обробляти цей матеріал на вищій швидкості. Встановлено, що фізико-механічні параметри під час оброблення інструментами з гексаніту-Р забезпечать їм високу продуктивність.

1. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения* / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова: в 10-ти т. – Одесса: ОНПУ, 2003. – **3**. – 550 с.
2. *Армарего И. Дж. А., Браун Р. Х.* Обработка металлов резанием / Пер. с англ. В. А. Пастунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
3. *Optimization of the process of machining of inhomogeneous built-up parts of tractors* / V. V. Koliomiets, R. V. Antoshchenkov, R. V. Ridnyi, S. A. Bogdanovich, and I. A. Fabrichnikova // *Materials Science*. – 2019. – **55**, № 1. – P. 52–62. DOI:10.1007/s11003-019-00251-w
4. *Пилянкевич А. П.* Практика электронной микроскопии. – М.: Машгиз, 1961. – 176 с.
5. *Кравченко Б. А.* Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов. – Куйбышев: Кн. изд-во, 1962. – 179 с.
6. *Особенности применения режущих инструментов из поликристаллического кубического нитрида бора с защитным покрытием* / С. А. Клименко, С. Ан. Клименко, А. С. Махонин, В. М. Берсенев // *Сверхтвердые материалы*. – 2017. – № 4. – С. 88–100.
7. *Перспективные типы покрытий для инструментов, оснащенных поликристаллическим КНБ* / А. С. Манохин, С. А. Клименко, С. Ан. Клименко, В. М. Берсенев // *Надтверді матеріали*. – 2018. – № 6. – С. 78–88.
8. *Influence of modification of 38KhN3MFA steel on the structural-phase state and cutting products under variable technological conditions* / O. I. Balyts'kyi, V. O. Kolesnikov, M. R. Havrylyuk // *Materials Science*. – 2020. – **55**, № 6. – P. 915–920. DOI:10.1007/s11003-020-00387-0
9. *Balyts'kyi O. I., Kolesnikov V. O., Havrylyuk M. R.* Influence of lubricating liquid on the formation of the products of cutting of 38KhN3MFA steel // *Materials Science*. – **55**, № 2. – P. 722–727. DOI:10.1007/s11003-019-00238-7
10. *Features for damage detection with insensitivity to environmental and operational variations* / E. J. Cross, G. Manson, K. Worden, and S. G. Pierce // *Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Phys. and Eng. Sci.* – 2012. – **468**, № 2148. – P. 4098–4122. <https://doi.org/10.1098/rspa.2012.0031>
11. *Kawiak M. and Balitskii A.* Embrittlement of welded joints of tram rails in city environments // *Eng. Failure Analysis*. – 2018. – **85**. – P. 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.12.011>
12. *Study of hydrogen influence on 1020 steel by low deformation method* / B. G. Mytsyk, Ya. L. Ivanytskyi, A. A. Balitskii, Ya. P. Kost', and O. M. Sakharuk // *Materials Letters*. – 2016. – **184**. – P. 328–331. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.065>
13. *Balitskii O. A., Kolesnikov V. O., and Balitskii A. I.* Wear resistance of hydrogenated high nitrogen steel at dry and solid state lubricants assistant friction // *Archives of Mat. Sci. and Eng.* – 2019. – Issue **2**, 98. – P. 57–67. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.4607>
14. *Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants* / O. A. Balitskii, V. O. Kolesnikov, A. I. Balitskii, J. J. Elias, and M. R. Havrylyuk // *Archives of Mat. Sci. and Eng.* – 2020. – **104** (2). – P. 49–57. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.4894>
15. *Features of sliding friction on thin-film Mo–S–C coatings prepared by pulsed laser deposition* / V. Yu. Fominski, R. I. Romanov, D. V. Fominski, S. M. Novikov, and A. V. Chesnokov // *J. of Friction and Wear*. – 2020. – **41**, № 1. – P. 8–24. <https://doi.org/10.3103/s1068366620010079>

Одержано 03.05.2019