

УДК 621.762.8

А.Н. ЖИГАЛОВ, канд. техн. наук, доц.

доцент кафедры технологии и оборудования машиностроения¹

E-mail: jigalov6@mail.ru

В.К. ШЕЛЕГ, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси

заведующий кафедрой «Технология машиностроения»²

E-mail: sheleh_v@tut.by

Д.Д. БОГДАН

аспирант¹

E-mail: dmitry_bogdan@tut.by

¹Барановичский государственный университет, г. Барановичи, Республика Беларусь²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25.08.2020.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

В результате проведения научных исследований разработан и запатентован метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), позволяющий обеспечивать достижение повышенных свойств твердых сплавов за счет снижения их дефектности, улучшения однородности структуры. Физика процесса АДУ заключается в том, что упрочняемое изделие предварительно нагревается до допустимой температуры, при которой твердый сплав не теряет приобретенную при изготовлении пластичность и твердость. Затем на изделие воздействуют волнами звуковой частоты, приведенными в диапазоне 140...160 Гц в резонансное состояние, при котором происходит образование увеличенной в несколько сот раз резонансной амплитуды. Дано описание сущности созданного метода АДУ. Приведена зависимость для определения энергии воздействия на упрочняемое твердое тело при АДУ. Представлена термодинамическая модель метода АДУ, основанная на энергетических тепловых и волновых воздействиях на упрочняемую структуру. Исходя из термодинамического объяснения, метод АДУ сводится к изменению исходной структуры твердого сплава под воздействием на нее температурного и волнового резонансного энергетических потоков, посредством которых в объекте упрочнения возбуждаются активационные и диссипативные процессы энергетического оттока в режиме открытой термодинамической системы. При этом квазистатический процесс переноса волновой энергии, осуществляемый в неравновесной среде, значительно превышает время релаксации упрочняющей системы. При упрочнении АДУ в твердых сплавах увеличивается ударная вязкость на 19–23 %, при этом достигаются величины ударной вязкости, равные 39,54–42,05 кДж/м², повышается твердость по параметру HRC на 3,0...5,2 %.

Ключевые слова: аэродинамическое звуковое упрочнение, твердые сплавы, термодинамическая модель

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-65-69>

Введение. Твердые сплавы, образованные путем спекания карбидов вольфрама, титана, тантала в кобальтовой связке, широко используются в машиностроительной промышленности. Однако твердосплавный инструмент, несмотря на свои высокие свойства по твердости (85...92 HRA), теплопроводности (50...85 Вт/(м·°C)), красностойкости (800...1000 °C), недостаточен эффективен для процессов прерывистого резания со значительными ударными нагрузками. Из-за относительно невысоких таких характеристик твердых сплавов, как ударная вязкость (25...75 КДж/м²), предел прочности при изгибе (980...2000 Н/мм²), при прерывистом резании наблюдается в несколько раз пониженная стой-

кость инструмента по сравнению с непрерывистым резанием, что связано со спецификой структурного формирования сплава при изготовлении. На всех этапах производства твердого сплава (измельчение, прессование, спекание) в его структуре образуется большое количество дефектов [1], плотность дислокаций имеет величины, равные 10⁶...10⁷ м⁻² [2]. С одной стороны, дислокационные образования способствуют повышению твердости, а с другой, снижают прочностные характеристики сплава. Для инструментов, работающих при прерывистом резании, требуются твердые сплавы с совершенно новыми, значительно отличающимися от известных, повышенными свойствами.

Метод АДУ. В результате проведения научных исследований разработан и запатентован метод АДУ [2], позволяющий обеспечивать достижение повышенных свойств твердых сплавов за счет снижения их дефектности, улучшения однородности структуры. Физика процесса АДУ заключается в том, что упрочняемое изделие предварительно нагревается до допустимой температуры $T_{\text{доп}}$ (°C), при которой твердый сплав не потеряет приобретенную при изготовлении пластичность и твердость. При этом внутренняя энергия E_T свободных колебаний атомов элементов твердого сплава массой m увеличивается на величину $E_T = 24,94338 \cdot m \cdot (T_{\text{доп}} + 273,15)$. Для атомов W, Ta, Ti, Co при $T_{\text{доп}} = 320$ °C энергия $E_T = (1,18...4,51) \cdot 10^{-21}$ Дж, что практически в 2 раза больше, чем при $T_{\text{доп}} = 20$ °C, когда $E_T = (0,58...2,23) \cdot 10^{-21}$ Дж [3]. Затем на изделие воздействуют звуковыми волнами, которые на частотах в диапазоне 140...160 Гц входят в резонанс, при котором происходит образование увеличенной в несколько сот раз резонансной амплитуды (рисунок 1).

Энергия, зависящая от допустимой температуры, параметров резонансной системы и кристаллической решетки твердого сплава, определяется [2]:

$$E_{\text{вн}} = 0,375 m \omega_{\text{рез}}^2 \left(2,72^{\left(\ln A_{\text{рез},k} + \delta L_k \right)^2} + 24,94 m (T_{\text{доп}} + 273,15) - \frac{1,68 \cdot 10^{-42}}{a \sqrt{m}} \right). \quad (1)$$

В результате из-за наложения эффектов, связанных с возрастанием резонансной амплитуды и квадратичному влиянию амплитуды на энергию, возникает сильнейший энергетический импульс, увеличенный в десятки тысяч раз относительно стационарных колебаний.

Метод АДУ реализуется следующим образом. Упрочняемые твердые сплавы выдерживают в термической печи при допустимой температуре в течение не менее 1,6 мин на 1 мм наибольшего размера упрочняемого изделия. После чего разогретые изделия перемещаются в камеру для АДУ, представляющую собой воздушный резонатор, в которую подается воздух под давлением в диапазоне от 1,5 до 2,0 бар и при часовом потреблении воздуха в объеме 2,5...5,0 м³ в зависимости от режима обработки. При таких режимах на частотах до

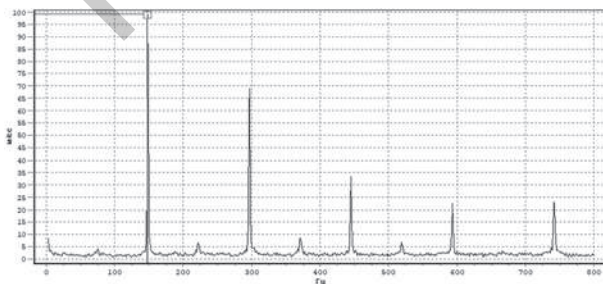


Рисунок 1 — Спектр амплитудных виброускорений на корпусе установки для АДУ

Figure 1 — Range of amplitude of vibration accelerations on the installation body for ADH

300 Гц в камере возникают резонансные амплитудные колебания противоположных стенок. Время выдержки в камере составляет 3...4 мин в зависимости от вида твердого сплава. После упрочнения производят несколько циклов старения при температуре 150...170 °C.

Целью работы является создание термодинамической модели, описывающей процессы, происходящие при методе АДУ.

Известно, что степень упрочнения и эксплуатационные свойства образованных структур определяются величиной поглощенной внутренней энергии и стабильностью структурно-энергетических параметров материала в процессе эксплуатации. Повышение свободной внутренней энергии при преобразовании исходной структуры в упрочненную является результатом взаимосвязанных физико-химических микроструктурных процессов, активность которых адекватна дисбалансу между активационными и диссипативными энергетическими потоками, развивающимися в упрочняемом материале за счет внешнего упрочняющего энергетического воздействия. Полнота реализации активационных и диссипативных микроструктурных процессов управляется плотностью энергетического потока упрочняющего воздействия и реакцией материала на него, интенсивностью энергопереноса в модифицированной структуре. Большинство активационных и диссипативных микроструктурных механизмов имеет ярко выраженную термофлуктуационную природу, характеризующуюся пороговыми энергиями, периодом активации и временем релаксации [4]. Метод АДУ, основанный на энергетических тепловых и волновых воздействиях на упрочняемую структуру, может быть представлен в виде термодинамической модели. Обобщенная структурная схема такой модели приведена на рисунке 2.

При заданных энергетических воздействиях, температурном (ТВ₁) и волновом (ВВ), на исходную структуру (ИС) в твердосплавном материале возникают активационные процессы (АП), связанные с возбуждением атомов структурных элементов твердых сплавов и переходом их из равновесного неактивного состояния в состояние с энергией, достаточной для осуществления смещения в равновесное состояние. При этом ИС,

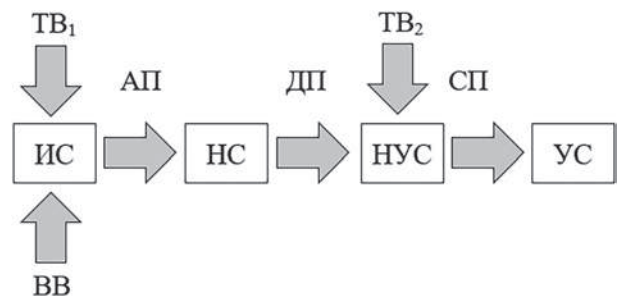


Рисунок 2 — Структурная схема термодинамической модели АДУ

Figure 2 — Block diagram of the ADH thermodynamic model

поглощая часть энергии от ТВ и ВВ, модифицируется в более высокое структурно-энергетическое состояние, обладающее максимальной свободной энергией. Такое состояние является неустойчивым (НС). При воздействии АП в неравновесной структуре начинают проявляться диссипативные процессы (ДП), связанные с рассеиванием накопленной энергии и приведением структуры твердых сплавов посредством самоорганизационных процессов в новое более устойчивое состояние (НУС). Однако состояние НУС для твердых сплавов является недолгосуществующим, способным под действием не полностью рассеянной внутренней энергии, накопленной при АП, возвращаться в близкое к ИС состоянию. В связи с чем для сохранения достигнутых свойств структура НУС посредством стабилизационных процессов (СП) подвергается дополнительному ТВ₂, необходимо для осуществления более глубокого рассеяния внутренней энергией, накопленной при АП. В результате структура НУС стабилизируется в устойчивую структуру (УС) с заданными на этапе НУС свойствами.

Согласно первому началу термодинамики свободная энергия для системы, изображенной на рисунке 2, определяется как:

$$E_{ТВ1} + E_{ТВ2} + E_{ВВ} = E_{АП} + E_{ДП} + E_{СП}, \quad (2)$$

где $E_{ТВ1}$ — энергия от температуры ТВ₁; $E_{ТВ2}$ — энергия от температуры ТВ₂; $E_{ВВ}$ — энергия от волнового воздействия; $E_{АП}$ — энергия от активационных процессов; $E_{ДП}$ — энергия от диссипативных процессов; $E_{СП}$ — энергия от стабилизационных процессов.

За счет внутренних энергий $E_{АП}$, $E_{ДП}$, $E_{СП}$ совершается работа, направленная на изменение внутренних процессов в системе, в результате чего происходит увеличение теплоемкости, смещение компонентов структуры и другие процессы.

Величина поглощенной внутренней энергии при выходе материала в состояние НС равна суммарной энергии АП:

$$\Delta E_{НС} = E_{АП}. \quad (3)$$

При АДУ часть внутренней энергии в ДП диссипатируется: происходит переход части энергии упорядоченных процессов в энергию неупорядоченных процессов. Диссипативная составляющая $E_{ДП}^*$ энергобаланса направлена на осуществление релаксации упругих внутренних напряжений и микроструктурных превращений. Тогда баланс энергий согласно первому началу термодинамики для процесса формирования НУС представляется в виде:

$$\Delta E_{НУС} = \Delta E_{НС} - E_{ТВ2} - E_{ДП}^*. \quad (4)$$

Величина поглощенной внутренней энергии при выходе материала в состояние УС равна:

$$\Delta E_{УС} = \Delta E_{НУС} + E_{СП}. \quad (5)$$

Так как термодинамические диссипативные процессы при АДУ являются неравновесными, то интенсивность диссипации напрямую связана с производством энтропии системы. Энтропия S_3 при АДУ связана с количеством произведенной волновой энергии за промежуток времени $t_{ДП}$, которую нужно сообщить системе, чтобы перевести ее из состояния ИС в состояние УС по определенному технологическому квазистатическому пути, при котором длительность протекания процесса перехода термодинамической системы из состояния ИС в состояние УС значительно превышает время релаксации упрочняющей системы. При этом S_3 равна:

$$S_3 = E_{ВВ} / T_{доп}. \quad (6)$$

Термодинамическое состояние при осуществлении метода АДУ связано с преодолением ряда энергетических этапов: через возбуждающие энергии ТВ₁ и ВВ приведение системы посредством процесса АП в состояние НС, а затем посредством процесса ДП — в состояние НУС; последующая стабилизация посредством тепловой энергии ТВ₂ через процесс СП, до состояния УС. Релаксационные изменения в структуре упрочняемых сплавов происходят в пределах осуществления процесса ДП. Процессы ДП и СП имеют значительно более высокие временные периоды, чем процесс АП, так как диссипативные и стабилизационные процессы протекают при более низких энергетических тепловых воздействиях: энергия ТВ₂ в два раза меньше, чем энергия ТВ₁.

Решая систему уравнений (2)–(5), получим

$$\Delta E_{УС} = E_{ТВ1} + E_{ВВ} - E_{ДП} - E_{ДП}^*. \quad (7)$$

С учетом энтропийного представления тепловой диссипативный процесс (7) описывается в виде:

$$\Delta E_{УС} = E_{ТВ1} + E_{ВВ} - S_3 \cdot T_{доп} - E_{ДП}^*. \quad (8)$$

Так как процесс упрочнения при АДУ предусматривает выполнение условия

$$\Delta E_{УС} > 0, \quad (9)$$

то (8) будет представлено в виде:

$$E_{ДП}^* < E_{ТВ1} + E_{ВВ} - S_3 \cdot T_{доп}. \quad (10)$$

Исходя из термодинамического объяснения, метод АДУ сводится к изменению исходной структуры твердого сплава под воздействием на нее двух энергетических потоков (температурного и волнового резонансного), посредством которых в объекте упрочнения возбуждаются активационные и диссипативные процессы энергетического оттока в режиме открытой термодинамической системы. При этом квазистатический процесс переноса волновой энергии, осуществляемый в неравновесной среде, значительно превышает время релаксации упрочняющей системы.

Проведены масштабные теоретические [3, 5, 7] и экспериментальные [4, 6, 8–11] исследования метода АДУ.

Экспериментально установлено, что при упрочнении АДУ в твердых сплавах увеличивается ударная вязкость на 19–23 %, при этом достигаются величины ударной вязкости, равные 39,54–42,05 КДж/м². После АДУ в твердых сплавах в поверхностном слое до 0,7 мм наблюдается повышение твердости по параметру HRC на 3,0...5,2 %, с глубины свыше 0,7 мм изменений микротвердости в упрочненных методом АДУ образцах по сравнению с базовыми не наблюдается.

Производственные испытания в условиях ОАО «Беларуськалий» показали, что на 1000 т отбитой руды расход резцов ЛКМЯ 34.359.00-02, упрочненных АДУ, составляет 3,5 шт., что в 2,48 раза меньше, чем резцов без АДУ.

Выводы. 1. Дано описание сущности созданного метода АДУ, позволяющего обеспечивать достижение повышенных свойств твердых сплавов за счет снижения дефектности и улучшения однородности структуры.

2. Приведена зависимость для определения энергии воздействия на упрочняемое твердое тело при АДУ.

3. Представлена термодинамическая модель метода АДУ, основанная на энергетических тепловых и волновых воздействиях на упрочняемую структуру. Исходя из термодинамического объяснения, метод АДУ сводится к изменению исходной структуры твердого сплава под воздействием на нее температурного и волнового резонансного энергетических потоков, посредством которых в объекте упрочнения возбуждаются активационные и диссипативные процессы энергетического оттока в режиме открытой термодинамической системы. При этом квазистатический процесс переноса волновой энергии, осуществляемый в неравновесной среде, значительно превышает время релаксации упрочняющей системы.

4. Установлено, что при упрочнении АДУ в твердых сплавах увеличивается ударная вязкость на 19–23 %, при этом достигаются величины ударной вязкости, равные 39,54–42,05 КДж/м². После АДУ в твердых сплавах в поверхностном слое

до 0,7 мм наблюдается повышение твердости по параметру HRC на 3,0...5,2 %, с глубины свыше 0,7 мм изменений микротвердости в упрочненных методом АДУ образцах по сравнению с базовыми не наблюдается.

5. Производственные испытания показали, что расход резцов ЛКМЯ 34.359.00-02, упрочненных АДУ, которые применяются для добычи калийных руд, уменьшаются в 2,48 раза по сравнению с неупрочненными.

Список литературы

1. Ван-Бюрен, Х.Г. Дефекты в кристаллах / Х.Г. Ван-Бюрен. — М.: Иностранная литература, 1962. — 610 с.
2. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. ВУ 2557175 / А.Н. Жигалов, Г.Ф. Шатуров, В.М. Головкин. — Опубл. 20.07.2015.
3. Жигалов, А.Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: монография / А.Н. Жигалов, В.К. Шелег. — Могилев: МГУП, 2019. — 213 с.
4. Мокрицкий, Б.Я. Технологическое обеспечение упрочнения и оценки качества металлорежущего инструмента: учеб. / Б.Я. Мокрицкий, С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе. — Старый Оскол: ТНТ, 2016. — 368 с.
5. Жигалов, А.Н. Влияние аэродинамического звукового воздействия на дислокационную структуру твердых сплавов / А.Н. Жигалов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: мат.-лы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2015 г. — Могилев, Белорус.-Рос. ун-т, 2015. — С. 105.
6. Жигалов, А.Н. Повышение эффективности фрезерования путем совершенствования структуры режущих твердых сплавов / А.Н. Жигалов, А.Р. Маслов, Г.Ф. Шатуров // Вестн. машиностроения. — 2015. — № 8. — С. 20–23.
7. Zhigalov, A.N. Improved Hard Alloys for Efficient Milling / A.N. Zhigalov, A.R. Maslov, G.F. Shaturov // Russian Engineering Research. — 2015. — Vol. 35, No. 11. — Pp. 818–821.
8. Шелег, В.К. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали / В.К. Шелег, А.Н. Жигалов // Горная механика и машиностроение. — 2019. — № 3. — С. 56–65.
9. Шелег, В.К. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ металлорежущих твердосплавных пластин с покрытиями / В.К. Шелег, А.Н. Жигалов, Д.Д. Богдан // Наука и техника. — 2020. — Т. 19, № 4. — С. 271–279.
10. Жигалов, А.Н. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на свойства твердых сплавов / А.Н. Жигалов, Д.Д. Богдан, И.А. Горавский // Вестн. БарГУ, Технич. науки. — 2020. — Вып. 8. — С. 53–68.
11. Жигалов, А.Н. Оптимизация износа и ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента сплава В354, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А.Н. Жигалов, И.А. Горавский, Д.Д. Богдан // Вестн. БарГУ, Технич. науки. — 2020. — Вып. 8. — С. 69–78.

JIGALOV Anatoliy N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment¹

E-mail: jigalov6@mail.ru

SHELEG Valeriy K., D. Sc. in Eng., Prof., Corresponding Member of the NAS of Belarus

Head of the Department of “Mechanical Engineering Technology”²

E-mail: sheleh_v@tut.by

BOGDAN Dmitriy D.

Ph. D. Student¹

E-mail: dmitry_bogdan@tut.by

¹Baranovichi State University, Baranovichi, Republic of Belarus²Belarusian National State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 25 August 2020.

THERMODYNAMIC MODEL OF AERODYNAMIC SOUND HARDENING METHOD

As a result of scientific research, a method of aerodynamic sound hardening (ADH) has been developed and patented, which makes it possible to achieve improved properties of hard alloys by reducing their defectiveness, improving the homogeneity of the structure. The physics of the ADH process is that the hardened product is preheated to an acceptable temperature at which the hard alloy does not lose the plasticity and hardness acquired during manufacture. Then the product is exposed to sound frequency waves, reduced in the range of 140...160 Hz into a resonant state, in which the formation of a resonant amplitude increased by several hundred times occurs. The article gives a description of the essence of the created ADH method. The dependence for determining the action energy on a hardened solid by ADH is provided. A thermodynamic model of the ADH method is presented, based on energy thermal and wave effects on the hardened structure. On the basis of the thermodynamic explanation, the ADH method is reduced to a change in the initial structure of the hard alloy under the influence of temperature and wave resonant energy fluxes on it, through which activating and dissipative processes of energy outflow are excited in the hardening object in the mode of an open thermodynamic system. In addition, the quasi-static process of wave energy transfer, carried out in a non-equilibrium medium, significantly exceeds the relaxation time of the strengthening system. When hardening by ADH, the impact toughness increases by 19–23 % in hard alloys, while the values of impact toughness equal to 39.54–42.05 kJ/m² are achieved, the hardness according to the HRC parameter increases by 3.0–5.2 %.

Keywords: aerodynamic sound hardening, hard alloys, thermodynamic model

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-65-69>

References

1. Van Bueren H.G. *Imperfections in crystals*. Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1960. 676 p.
2. Jigalov A.N., Shaturov G.F., Golovkov V.M. *Sposob aerodinamicheskogo uprochneniya izdeliy* [Method of aerodynamic hardening of products]. Patent RB, no. 2557175, 2015 (in Russ.).
3. Jigalov A.N., Sheleg V.K. *Teoreticheskie osnovy aerodinamicheskogo zvukovogo uprochneniya tverdosplavnogo instrumenta dlya protsessov preryvistogo rezaniya* [Theoretical bases of the aerodynamic sound hardening of hard-alloy instrument for the processes of interrupted cutting]. Mogilev, Mogilevskiy gosudarstvennyy universitet prodovolstviya Publ., 2019. 213 p. (in Russ.).
4. Mokritskiy B.Ya., Grigorev S.N., Skhirtladze A.G. *Tekhnologicheskoe obespechenie uprochneniya i otsenki kachestva metallo-rezhushchego instrumenta* [Technological support for hardening and quality assessment of metal-cutting tools]. Stary Oskol, TNT Publ., 2016. 368 p. (in Russ.).
5. Jigalov A.N. *Vliyaniye aerodinamicheskogo zvukovogo vozdeystviya na dislokatsionnyuyu strukturu tverdykh splavov* [Effect of aerodynamic sound effects on the dislocation structure of hard alloys]. *Materialy, oborudovanie i resursoberegayushchie tekhnologii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials, equipment and resource-saving technologies. Proc. International scientific and technical conference]. Mogilev, 2015, p. 105 (in Russ.).
6. Zhigalov A.N., Maslov A.R., Shaturov G.F. *Povysheniye effektivnosti frezerovaniya putem sovershenstvovaniya struktury rezhushchikh tverdykh splavov* [Effectiveness increase of milling by improvement of structure of cutting hard alloys]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2015, no. 8, pp. 20–23 (in Russ.).
7. Zhigalov A.N., Maslov A.R., Shaturov G.F. *Improved hard alloys for efficient milling*. *Russian engineering research*, 2015, vol. 35, no. 11, pp. 818–821.
8. Sheleg V.K., Jigalov A.N. *Issledovanie vliyaniya metoda aerodinamicheskogo zvukovogo uprochneniya na iznos tverdosplavnogo instrumenta pri frezernoy obrabotke materiala iz stali* [Research of the influence of the method of aerodynamic sound hardening on wear of a hard-carbide tool during milling steel material]. *Mining mechanical engineering and machine-building*, 2019, no. 3, pp. 56–65 (in Russ.).
9. Sheleg V.K., Jigalov A.N., Bogdan D.D. *Issledovanie vliyaniya aerodinamicheskogo zvukovogo uprochneniya na iznos metallo-rezhushchikh tverdosplavnykh plastin s pokrytiami* [Study on effect of aerodynamic sound hardening for wear of coated carbide metal plates]. *Science & technique*, 2020, vol. 19, no. 4, pp. 271–279 (in Russ.).
10. Jigalov A.N., Bogdan D.D., Goravskii I.A. *Issledovanie vliyaniya aerodinamicheskogo zvukovogo uprochneniya na svoystva tverdykh splavov* [The studies of the influence of aerodynamic sound hardening on the properties of hard alloys]. *BarSU herald. Series engineering*, 2020, iss. 8, pp. 53–68 (in Russ.).
11. Jigalov A.N., Goravskii I.A., Bogdan D.D. *Optimizatsiya iznosa i resursa metallo-rezhushchego tverdosplavnogo instrumenta splava B35, uprochnennogo aerodinamicheskim zvukovym metodom* [Optimization of the wear and resource of a metal-cutting carbide tool of B35 alloy strengthened by the aerodynamic sound method]. *BarSU herald. Series engineering*, 2020, iss. 8, pp. 69–78 (in Russ.).