

УДК 621.9

## ИННОВАЦИИ ПРИ СОЗДАНИИ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

*ШЕЛЕГ Валерий Константинович<sup>1</sup>, Чл.-кор. НАН Беларуси, доктор техн. наук., профессор,*

*e-mail: Sheleh\_v@tut.by*

*ЖИГАЛОВ Анатолий Николаевич<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент*

*e-mail: jigalov6@mail.ru*

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65

<sup>2</sup>Барановичский государственный университет,  
225404, Республика Беларусь, г. Барановичи, ул. Войкова, 21

**Аннотация:** Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) позволяет обеспечивать значительное повышение стойкости твердых сплавов, работающих в тяжелых технологических условиях с переменной ударной нагрузкой. Эффект при упрочнении таким методом достигается за счет воздействия волн звуковой частоты на структуру твердых сплавов. Метод АДУ способен с небольшой добавленной стоимостью улучшать стойкостные характеристики твердосплавного инструмента (до 3,7 раза), за счет повышения ударной вязкости до 90 КДж/м<sup>2</sup> и предела прочности при изгибе до 223 кг/мм<sup>2</sup> при сохранении высокой твердости до 92 HRA и плотности до 15·10<sup>3</sup> кг/см<sup>3</sup>. При создании метода АДУ использовались ряд инновационных решений: математическая модель образования энергии в твердых сплавах, отличающаяся учетом влияния акустических волн звуковой частоты, приведенных в резонансное состояние, и предварительного теплового нагрева от внешнего источника на генерируемую энергию в атомах кристаллических решетках; математическое описание механизма аэродинамического звукового упрочнения, связанного с накачкой энергий в твердое тело, смещением атомов кристаллической решетки и дислокаций в свободное, а затем в самоорганизованное состояние; математическая модель и методика параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента; метод имитационного моделирования явлений, происходящих в зоне резания, на базе созданной реологической модели; механизм аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента.

**Ключевые слова:** инновационные решения, метод аэродинамического звукового упрочнения, прерывистые поверхности, твердые сплавы.

### Введение

В настоящее время твердосплавный инструмент широко применяется в современном машиностроении для обработки различных поверхностей. Но, к сожалению, такие недостатки твердых сплавов, как их повышенная хрупкость, относительно невысокие значения предела прочности при изгибе (98...200 кгс/мм<sup>2</sup>) и ударной вязкости (25...75 КДж/м<sup>2</sup>) значительно снижают эффективность использования твердосплавных пластин при прерывистом резании в связи с тем, что такие пластины работают в наиболее тяжелых условиях, связанных с наличием ударных нагрузок, при частых циклических изменениях температурного поля на режущем клине инструмента при рабочих и холостых ходах, неблагоприятном расположении режущего клина в процессе стружкообразования и других явлений. Стойкость пластин при этом является невысокой, приблизительно в два раза ниже, чем при непрерывном резании. Специфика обработки поверхностей деталей машин при прерывистом резании требует наличия более совершенного твердосплавного инструмента, обладающего одновременно высокими показателями как по твердости, так и по ударной вязкости. В настоящее время не существует эффективных методов упрочнения твердосплавного инструмента, предназначенного для работы с ударными нагрузками.

В связи с чем, весьма перспективным является создание новых методов упрочнения, основанных на высокоэнергетических, низкотемпературных воздействиях. Однако любой технологический метод не в состоянии обеспечить его высокую эффективность без наличия инноваций (внедренных новшеств) положенных в основу его создания.

### Основная часть

Разработан и исследован метод АДУ [1-5], позволяющий обеспечивать значительное повышение стойкости твердых сплавов, представляющих собой гетерогенные композиции, состоящие из порошков карбидов вольфрама, титана, тантала, цементированных кобальтовой связкой, работающих в тяжелых технологических условиях с переменной ударной нагрузкой. Эффект при упрочнении таким методом достигается за счет воздействия волн звуковой частоты на структуру твердых сплавов. В обработанных твердых сплавах происходит измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры [2]. Реализация такого воздействия основана на процессах, протекающих в кристаллической решетке твердых сплавов. Метод АДУ способен с небольшой добавленной стоимостью существенно улучшать стойкостные характеристики твердосплавного инструмента (до 3,7 раза), за счет повышения ударной вязкости до 90 КДж/м<sup>2</sup> и предела прочности при изгибе до 223 кг/мм<sup>2</sup> при сохранении высокой твердости до 92 HRA и плотности до 15·10<sup>3</sup> кг/см<sup>3</sup>, тем самым решить важную проблему, связанную с обработкой прерывистых поверхностей, и уменьшить импорт закупаемого твердосплавного инструмента.

При создании метода АДУ, моделей и методик для его исследования использовалось ряд инновационных решений.

Инновационной разработкой, на базе которой создан метод АДУ, является математическая модель образования энергии в твердых сплавах, отличающаяся учетом влияния акустических волн звуковой частоты, приведенных в резонансное состояние, и предварительного теплового нагрева от внешнего источника, на генерируемую энергию в атомах кристаллических решетках, позволяющая устанавливать значения амплитудно-частотных параметров и температуры при которых возникающая энергия создает условия для смещения атомов кристаллических решеток элементов твердых сплавов и дислокационных образований, возникших от дефектов, связанных с нарушениями периодичности положения атомов в кристаллической решетке, в пределах всей структуры упрочняемого материала. Математическая модель образования внешней энергии, способной осуществить смещение атомов кристаллической решетки элементов твердых сплавов, на языке математики может быть описана в виде

$$E_{\text{вн}} = \rho(2,72 (\ln v_{\text{рез}L_k} + \delta L_k))^2 + 49,89m(T_{\text{доп}} + 273,15) - m\omega_{\text{max}}^2 A_{\omega_{\text{max}}}^2,$$

где  $\rho$  — плотность среды;

$v_{\text{рез}L_k}$  — резонансная скорость звукового давления на расстоянии  $L_k$ ;

$L_k$  — расстояние от одной из вибрирующих стенок камеры до точки, расположенной между стенками камеры;

$\delta$  — коэффициент затухания среды;

$m$  — масса атома;

$T_{\text{доп}}$  — максимальная величина допустимой температуры, при которой не происходит изменение свойств материала;

$\omega_{\text{max}}$  — максимальная частота свободных колебаний атомов кристаллической решетки;

$A_{\omega_{\text{max}}}$  — амплитуда свободных колебаний атомов кристаллической решетки при максимальной частоте  $\omega_{\text{max}}$ .

Для смещения атомов из положения равновесия необходимо создать такую внешнюю энергию акустических волн, которая будет зависеть от резонансной скорости (амплитуды) внешних воздействий, максимальной частоты свободных колебаний атомов, строения и параметров кристаллической решетки, а также температурного состояния самого твердого тела. При наличии в твердом сплаве атомной цепочки, состоящей из атомов двух и более сортов, от-

личающихся между собой по атомным массам, имеющих более тяжелую и более легкую массы, то в такой цепочке возможно возникновение двух и более типов нормальных колебаний, свойственных каждому для более тяжелого и более легкого атомов, при этом для более тяжелых атомов частота колебаний будет ниже, чем для более легких.

С использованием основных положений теорий волновых процессов, квантовой физики, классической теплоемкости и термодинамики, дислокаций, самоорганизации и хаотизации, упругости и пластичности, реологии, а также с применением технологии функционально-ориентированного проектирования и имитационного реологического моделирования, дано математическое описание механизма аэродинамического звукового упрочнения, связанного с накачкой энергий в твердое тело, смещением атомов кристаллической решетки и дислокаций в свободное, а затем в самоорганизованное состояние, следующим алгоритмом [6], включающий в себя ряд инновационных решений.

Но-мер фазы	Содержание фазы	Проявление фазы	Математическое описание фазы
1	Анализ структуры, фазового состояния, вида, сложности, параметров кристаллической решетки упрочняемого изделия	Определение максимальных частот $\omega_{\max}$ и амплитуд $A_{\omega_{\max}}$ собственных нулевых колебаний атомов кристаллических решеток при которых атомы переходят в другое состояние (где $a$ – межатомное расстояние, м; $m$ – масса атома, кг; $\hbar$ – постоянная Планка, Дж·с)	$\omega_{\max} = \frac{2,53 \cdot 10^{-9}}{a\sqrt{m}}$ $A_{\omega_{\max}} = 4,97 \cdot 10^{-13} \sqrt{\frac{a}{m}}$
2	Определение максимальной энергии свободных колебаний атомов	Энергии $E_{св_{\max}}$ достаточно для смещения атомов	$E_{св_{\max}} = \frac{m\omega_{\max}^2 A_{\omega_{\max}}^2}{2}$
3	Нагрев изделия до допустимой температуры $T_{доп} = (0,1 \dots 0,3)T_{пл}(T_{сп})$	Происходит увеличение частоты свободных колебаний атомом кристаллических решеток до значения $\omega_{св}$ (где $l$ – количество атомов в элементарной ячейке; $N$ – число элементарных ячеек кристалла в единице объема; $k_B$ – постоянная Больцмана, Дж/К)	$\omega_{св} = \frac{6lNk_B(T_{доп} + 273,15)}{h}$
4	Определение энергии свободных колебаний атомов от $T_{доп}$	Происходит насыщение энергией $ET$ атомов	$ET = 24,94338 \cdot m \cdot (T_{доп} + 273,15)$
5	Определение энергии внешнего воздействия	Энергии $E_{эв}$ достаточно для воздействия на упрочняемое тело	$E_{эв} \geq E_{св_{\max}} - E_m$
6	Создание управляемого звукового резонансного устройства	Созданное устройство для АДУ должно иметь соответствующие параметры: $P_{в}$ – давление воздуха в сети; $\omega_1; \omega_2$ – частоты колебаний противоположных стенок устройства для АДУ; $\delta$ – коэффициент затухания; $Q$ – добротность резонатора	$P_{в} = (1,5 \dots 2,0) \text{ бар};$ $\omega_1 = \omega_2$ $\omega_{рез} = \sqrt{\omega_1^2 - 2\delta^2}$ ; $Q > 6 \cdot 10 + 10$
7	Размещение упрочняемого изделия в устройстве для АДУ	Изменяется коэффициент затухания $\delta$ (где $A_0, A_L$ – амплитуда звукового давления на стенке камеры и на расстоянии $L$ , мкм; $k_{\delta} = \frac{1}{L}$ – коэффициент, учитывающий расположение изделия в камере; $L$ – расстояние от одной из вибрирующих	$\delta = k_{\delta} \ln\left(\frac{A_0}{A_L}\right)$

		стенок камеры до точки, расположенной между стенками камеры, м)	
8	Воздействие энергией аэродинамического резонатора	Происходит образование энергии от резонатора	$ET = 24,94338 \cdot m \cdot (T_{доп} + 273,15)$
9	Время внешнего воздействия	Время работы устройства	$t_{вн} = (1,5 \dots 4,0)$ мин

Реализация метода АДУ наглядно представлена на рис., на котором приведены значения виброускорений, измеренные на корпусе установки, реализующей механизм упрочнения при АДУ.

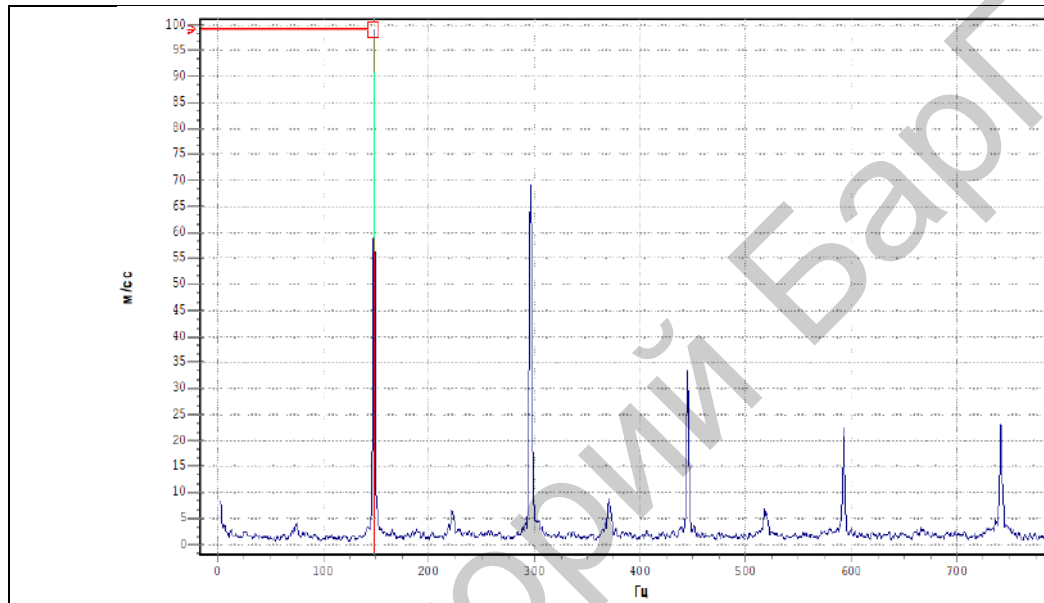


Рисунок 1 – Спектр амплитудных виброускорений на корпусе установки для АДУ в зависимости от частоты колебаний

Из рис. видно, при реализации метода АДУ на определенных частотах в звуковом спектре волновых колебаний образуются резонансные скорости  $v_{рез}$  (амплитуды  $A_{рез}$ ) внешних колебаний, увеличение которых достигает в 50...200 раз и более (в зависимости от конструкции устройства для АДУ) относительно нерезонансного колебательного состояния. В связи с тем, что энергия внешнего волнового воздействия находится в квадратных зависимостях от  $\omega_{рез}$  и  $A_{рез}$ , то увеличение  $A_{рез}$ , например, в 100 раз, приведет к увеличению внешней энергии до 10000 раз. В связи с чем разработанный механизм АДУ, являясь высокоэнергетическим и причем низкотемпературным процессом, позволяет оказывать воздействие по всему объему упрочняемого материала, как на зерновом, так и на кристаллическом уровне элементов его составляющих, входящих в твердые сплавы, осуществляя, тем самым, их структурные перестройки за счет изменения размеров кристаллитов, плотности дислокаций, снижения искаженности кристаллических решеток.

Предложены также инновационные математическая модель и методика параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, основанные на учете экспериментальных значений результатов износа и математически описываемых комбинированных связей исследуемых параметров, позволяющие осуществлять прогнозирование оптимальных технологических параметров, обеспечивающих достижение максимальной ресурсной стойкости режущего инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, на стадии подготовки производства.

Создан метод имитационного моделирования явлений [7], происходящих в зоне резания, на базе созданной реологической модели, основанной на решении контактной задачи теории упругости поведения режущего лезвия, представленного в виде жесткого пуансона, вдавливаемого в упругое полупространство на глубину, величина которой зависит от размера деформируемого при срезании слоя и возникших сил на фаске износа из-за упругой деформации обрабатываемого материала и скругления лезвия режущего инструмента, отождествлении хрупкого и пластического разрушения с плоским смещением, соответствии кинематики резания структурной модели износа, и аналитических приложениях, описывающих известные закономерности при резании, который позволяет производить анализ и оценку явлений внутреннего трения, адгезии, интенсивности сдвига, формирования износа, деформационных, термодинамических, микрогеометрических параметров, происходящих в зоне резания упрочненным аэродинамическим методом твердосплавным инструментом.

Указанные инновационные решения позволили разработать механизм аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента, а также создать его физическую модель, отличающиеся от известных тем, что необходимый уровень энергии, способной произвести смещение атомов кристаллических решеток твердых сплавов из положения равновесия за счет увеличения колебаний атомов кристаллической решетки, обеспечивается нагревом упрочняемого твердого сплава до температуры, равной 10...30% температуры спекания, и воздействием на него акустических волн от резонансной амплитуды вынужденных колебаний на звуковых частотах, образованных от колебаний двух параллельно расположенных поверхностей резонатора под действием воздушного потока, а сохранение созданного за счет самоорганизационных процессов равновесного состояния кристаллических решеток и дислокационных структур достигается старением, который позволяет обеспечивать повышение стойкости твердосплавного инструмента работающего при прерывистом резании с ударными нагрузками.

### Выводы

Проведенные лабораторные исследования метода АДУ подтвердили теоретические разработки и показали, что после упрочнения методом АДУ происходит уменьшение количества крупных и возрастание количества мелких зерен, происходит уменьшение размеров кристаллов, происходит снижение плотности дислокаций (для твердых сплавов ВК8 и Т5К10 уменьшается на 12...16% по сравнению с неупрочненными твердыми сплавами), повышаются прочностные свойства твердых сплавов (для сплавов Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 рост ударной вязкости и предела прочности при изгибе — 19...23%), при этом не происходит снижения твердости и плотности. Метод АДУ позволяет получать твердосплавные пластины с новыми, ранее не известными физико-механическими свойствами, причем с более высокими, чем стандартные.

Проведенные многочисленные опытно-промышленные апробации метода аэродинамического упрочнения в производственных условиях, подтвердили его эффективность. Так, производственные испытания на ОАО «Победит», г.Владикавказ, Россия показали, что стойкость серийных твердосплавных пластин, выпускаемых ОАО «Победит», увеличивается в 1,7...2,5 раза. Фрезы твердосплавные с нанесенным методом PVD наноструктурированным покрытием TiAlCrN, производства ЗАО «НИР», г.Рыбинск, Россия после упрочнения показали повышение стойкости на 52% по сравнению с необработанными. Ресурсная стойкость пластин 110408 Т5К10 при обработке стали 45 на фрезерно-торцевальной операции в условиях завода ОАО «Могилевский завод Электродвигатель», г.Могилев показала повышение в 2,4 раза. Стойкость пластин PNUA-110408 сплава ВК8, упрочненных АДУ, при обработке чугуна СЧ30 на ОАО «Могилевский завод Строммашина», повысилась в 2,5 раза по сравнению с ГОСТовскими пластинами. Результаты производственных испытаний в условиях ЗАО Промлизинг», г.Могилев показали, что упрочнение методом АДУ пластин Т15К6 при обработке державок из стали 45 позволяет повысить стойкость пластин в 3,1 раза по сравнению с неупрочненными пластинами. Результаты исследований на ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит» показали, что упрочнение методом АДУ ножей твердосплавных 2021-0015 ВК60° ГОСТ 24359-80 для торцовых фрез при обработке чугуна ВК позволяет повысить стойкость ножей в 2,0 раза. Упрочнение методом АДУ пластин твердосплавных Н10 PNUM1100408 для торцовых фрез при обработке стали 45 и 40Х повышает стойкость пластин в 1,8 раза.

**Список литературы**

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. – Оpubл. 30.06.2017.
2. Жигалов, А. Н. Адаптивное управление при совмещенной обработке резанием и ППД / А. Н. Жигалов. – Могилев: УО «МГУП», 2013. – 236 с.
3. Шелег, В.К. Основы создания и исследование метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / Шелег В.К., Жигалов А. Н. // Материалы 34-й Междун. науч.-техн. конф. «Перспективные направления развития технологий машиностроения и металлообработки», Минск, 28 марта 2019 г. / В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2019. – С. 184-186.
4. Шелег, В. К. Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик при аэродинамическом звуковом упрочнении твердых сплавов В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 1. – с. 11-20.
5. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического упрочнения на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Машиностроение : Респ. Межведомств. Сб. науч. Тр. Вып.31 / Под ред. В. К. Шелега. – Минск : БНТУ, 2018. – с. 37-48.
6. Жигалов, А. Н. Алгоритм энергообмена при температурно-волновом воздействии метода аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жигалов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы пятой Междунар. науч.-практ. конф., 16-17 мая 2019 г., Минск, М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т прикладной физ. Проблем им А.Н.Севченко» Беларус. Гос. Ун-та; ред.кол. –Минск: 2019. – С. 178-180.
7. Zhigalov, A.N. Investigation of the carbide-tipped tool wear hardened by method of aerodynamic impact / A. N. Zhigalov, V. V. Stypnicki // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2018. – Vol. 32, № 6. – P. 818 – 821.

## INNOVATIONS IN CREATING OF THE METHOD OF AERODYNAMIC SOUND HARDENING OF A CARBIDE ALLOY INSTRUMENT

<sup>1</sup>Sheleg V.K., doctor tech. sciences, professor,

<sup>2</sup>Zhigalov A.N., Ph.D. tech. sciences, associate professor

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, 220013, Republic of Belarus, Minsk, Independence Avenue, 65

<sup>2</sup>Baranavichy State University, 225404, Republic of Belarus, Baranavichy, ul. Voikova, 21

**Abstract**

The method of aerodynamic sound hardening (ASH) allows to provide a significant increase in the resistance of carbide alloys operating in hard technological conditions with a variable shock load. The effect during hardening by this method is achieved due to the influence of sound frequency waves on the structure of carbide alloys. The ASH method is capable of improving the resistance characteristics of carbide tools (up to 3.7 times) with a small added cost, by increasing the toughness up to 90 KJ/m<sup>2</sup> and the tensile strength in bending up to 223 kg/mm<sup>2</sup> while maintaining high hardness up to 92 HRA and density up to 15·10<sup>3</sup> kg /cm<sup>3</sup>. In creating the ASH method, a number of innovative solutions was used: a mathematical model of energy generation in hard alloys, characterized by taking into account the influence of acoustic waves of sound frequency brought into resonance state and preliminary thermal heating from an external source on the generated energy in atoms of crystal lattices; a mathematical description of the mechanism of aerodynamic sound hardening associated with the pumping of energy into a solid, the displacement of the atoms of the crystal lattice and dislocations to a free and then self-organized state; mathematical model and method of parametric optimization of resource resistance of cutting carbide tools; a method of imitation modeling of phenomena occurring in the cutting zone, based on the created rheological model; mechanism of aerodynamic sound hardening of carbide tools.

**Keywords:** innovative solutions, aerodynamic sound hardening method, discontinuous surfaces, hard alloys.