

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-11-20>

УДК 621.9

## Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик при аэродинамическом звуковом упрочнении твердых сплавов

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег<sup>1)</sup>, канд. техн. наук А. Н. Жигалов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Барановичский государственный университет (Барановичи, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** Для повышения стойкости с одновременным сохранением высоких характеристик по твердости и плотности твердых сплавов, работающих в тяжелых технологических условиях с ударной нагрузкой, предложено за счет применения явления резонанса на частотах, соответствующих звуковому спектру волн, достигать такой внешней энергии, которой будет достаточно для смещения атомов карбидов и связи. Чтобы придать твердым сплавам новые свойства, разработан и запатентован метод аэродинамического упрочнения. Эффект при таком упрочнении достигается за счет высокоэнергетического при невысоких температурах воздействия звуковых волн на структуру твердых сплавов. В упрочненных твердых сплавах происходят измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры, улучшение параметров структуры для заданных условий эксплуатации. Полученные результаты подтверждают резонансный фактор энергетического воздействия при методе аэродинамического упрочнения. Экспериментально установлено, что для упрочнения данным методом твердых сплавов существуют два наиболее эффективных режима обработки, на каждом из которых имеется до пяти явно выраженных резонансных пиков амплитуд при определенных частотах, причем наиболее эффективная первая мода. Определены коэффициенты затухания при обработке твердых сплавов для каждого из режимов упрочнения. Результаты исследований подтверждают, что метод аэродинамического упрочнения является эффективным механизмом, изменяющим свойства твердых сплавов, работающих с ударными нагрузками: при упрочнении на резонансных частотах происходит повышение износостойкости твердосплавных пластин на 20–40 % по истечении 30 мин работы.

**Ключевые слова:** аэродинамическое упрочнение, твердые сплавы, износостойкость, амплитудно-частотные характеристики

**Для цитирования:** 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. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-11-20>

## Experimental Determination of Amplitude-Frequency Characteristics in Response to Sound Strengthening of Hard Alloys

V. K. Sheleg<sup>1)</sup>, A. N. Jigalov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Baranovichi State University (Baranovichi, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper proposes to reach such external energy which is sufficient for shifting carbide atoms and binding through application of resonance effect on frequencies that corresponds to sound wave spectrum. The energy is used to increase resistance of hard alloys with simultaneous preservation of high characteristics in hardness and density and which are operating under heavy technological conditions with an impact load. Method of aerodynamic strengthening has been developed

### Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Б. Хмельницкого, 9,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-74-54  
metech@bntu.by

### Address for correspondence

Sheleg Valery K.  
Belarusian National Technical University  
9 B. Hmelnitzkogo str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-74-54  
metech@bntu.by

and patented in order to impart new properties to hard alloys. While carrying out the strengthening the effect is reached due to high-energy action of sound waves on structure of hard alloys at low temperature. Milling of carbide phases and their redistribution, reduction of dislocation in internal structure, improvement structure parameters for specified operational conditions occur in strengthened hard alloys. The obtained results prove a resonance factor of energy deposition while using method of aerodynamic strengthening. It has been experimentally determined that in order to use this strengthening method for hard alloys there are two most efficient processing modes and each of them has up to five clearly expressed resonance amplitude spikes at specific frequencies and the most efficient one is the first mode. Attenuation ratios have been determined while processing hard alloys for every strengthening mode. Results of the research prove the fact that the method of aerodynamic strengthening is an efficient mechanism that changes properties of hard alloys operating with impact loads: improvement of wear resistance in hard alloy plates is reached by 20–40 % upon the expiry of 30 minute operational period while making strengthening at resonance frequencies.

**Keywords:** aerodynamic strengthening, hard alloys, wear resistance, amplitude-frequency characteristics

**For citation:** Sheleg V. K., Jigalov A. N. (2019) Experimental Determination of Amplitude-Frequency Characteristics in Response to Sound Strengthening of Hard Alloys. *Science and Technique*. 18 (1), 11–20. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-11-20> (in Russian)

## Введение

Для решения такой сложной технологической задачи, как повышение стойкости с одновременным сохранением высоких характеристик по твердости и плотности твердых сплавов, представляющих собой гетерогенные композиции, состоящие из карбидов вольфрама, титана и тантала, цементированных кобальтовой связкой и работающих в тяжелых технологических условиях с ударной нагрузкой, предложено за счет применения явления резонанса, свойственного волновым гармоническим процессам, значительно повысить энергию внешнего воздействия и тем самым существенно увеличить амплитуду колебаний при невысоких исходных частотах, находящихся в звуковом спектре колебаний. Достигается такая внешняя энергия, которой достаточно для смещения атомов карбидов и связки, являющихся основными элементами кристаллических решеток твердых сплавов; за счет этого твердым сплавам можно придать новые свойства.

Многочисленными исследованиями [1, 2] установлено, что при ультразвуковом воздействии происходят серьезные изменения физических и механических свойств материалов: улучшается чистота поверхности, более равномерно распределяется микротвердость по сечению; деформируется и разрушается поверхностная оксидная пленка; происходит релаксация внутренних напряжений и стабилизируется вся структура; снижаются статические напряжения; повышаются предельные суммарные степени деформации; формируется ультрамелкозернистая структура; изменяется структурно-

фазовое состояние; уменьшается предел текучести; увеличиваются пластические свойства; изменяется ударная вязкость. При этом степень упрочнения или разупрочнения зависит от исходного состояния обрабатываемого изделия, подводимой акустической мощности и режимов обработки. Хрупкие материалы носят «взрывообразное разрушение», пластичные разрушаются в виде трещин, по границам зерен. Влияние ультразвука подобно нагреву, в то же время акустической энергии требуется в  $10^7$  раз меньше, чем плотность тепловой энергии. Большинство закономерностей, характерных для ультразвуковых волн, в полной мере справедливо и для звуковых волн: описываются волновыми уравнениями, общими для всех частот. Ультразвуковые колебания имеют большую частоту в сравнении со звуковыми колебаниями при одинаковой скорости распространения и характеризуются значительно более короткими длинами волн.

Однако создание резонансных амплитуд при волновых колебаниях в диапазоне ультразвуковых частот невозможно за счет наличия инертности в колебательной системе. Следует отметить, что преобразование волн звуковой частоты в высокоэнергетические процессы и влияние их на твердые тела практически не исследованы. Нет исследований, связанных с созданием методов и устройств, позволяющих оказывать существенное влияние на изменение кристаллических и дислокационных структур, физических и механических свойств твердых материалов за счет использования волн звуковой

частоты. Не изучено влияние генерирующих знакопеременных нагрузок звуковой частоты высокой интенсивности на ударную вязкость и другие механические свойства, ресурсную износостойкость твердых тел. Отсутствуют обобщающие теоретические и экспериментальные исследования, которые позволили бы прогнозировать процесс упрочнения твердых сплавов за счет аэродинамического звукового воздействия, а также отсутствуют методики его эффективного управления.

Авторами разработан и запатентован метод аэродинамического упрочнения (АДУ) [3]. Эффект при упрочнении методом АДУ достигается за счет высокоэнергетического при невысоких температурах (до 400 °С) воздействия звуковых волн на структуру твердых сплавов. В упрочненных твердых сплавах происходит измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры, а за счет самоорганизации на уровне кристаллической решетки обеспечивается переход от беспорядочного движения флуктуаций и их хаотического состояния к новому порядку, позволяющему улучшать параметры структуры для заданных условий эксплуатации [4, 5].

Метод АДУ оказывает влияние на шероховатость обработанных поверхностей: в период приработки твердосплавных пластин шероховатость обработанной поверхности уменьшается пропорционально износу по задней поверхности, в период нормального износа изменение шероховатости имеет противоположный характер – сначала уменьшается, а затем увеличивается, причем с одинаковой и значительно меньшей, чем в период приработки, интенсивностью. Перегиб кривых шероховатости от износа твердосплавных пластин, упрочненных методом АДУ, возникает раньше, чем неупрочненных [6]. Проведенные исследования влияния на предел прочности при изгибе и твердость твердых сплавов показали, что при упрочнении методом АДУ пластин марок Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 твердость практически не изменяется по сравнению с базовыми, а предел прочности при изгибе увеличивается на 19–23 % [7].

Схема (в аксонометрии), характеризующая метод АДУ изделий, изображена на рис. 1.

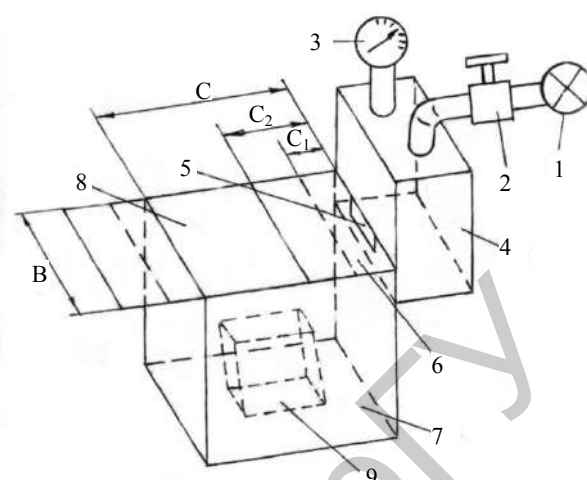


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для метода аэродинамического упрочнения:

- 1 – источник генерации воздуха; 2 – регулирующий вентиль; 3 – манометр; 4 – камера сглаживания пульсаций воздуха; 5 – щелевое сопло; 6 – выходной канал; 7 – резонансная камера; 8 – регулирующая заслонка; 9 – упрочняемое изделие

Fig. 1. Scheme of experimental unit for aerodynamic strengthening method:

- 1 – source of air generation; 2 – regulation valve; 3 – manometer; 4 – chamber for smoothing of air surges; 5 – slot nozzle; 6 – output channel; 7 – resonance chamber; 8 – control damper; 9 – product to be strengthened

Установка для АДУ является разновидностью объемного волнового резонатора и представляет собой замкнутый прямоугольный контур с линейными размерами, кратными  $\lambda/2 = \pi c/l = l/n$  (где  $\lambda$  – длина волны;  $c$  – скорость звука;  $l$  – расстояние между отражателями;  $n = 1, 2, 3, \dots$  – число полуволн). Причем параллельные более длинные стороны прямоугольника выполнены из металлических листов, способных по своим параметрам осуществлять колебательные движения, в отличие от боковых сторон и нижнего основания, выполненных значительно более жесткими. В таком контуре возникают собственные (нормальные) синусоидальные колебания. Возбуждающиеся акустические волны внутри контура, распространяющиеся между колеблющимися стенками через определенный частотный интервал, образуют резонансные пики – так называемые моды резонатора.

Упрочнение изделий методом АДУ осуществляется следующим образом. Производят подключение устройств, для чего камеру сглаживания пульсаций воздуха подключают к сети

генерации воздуха, соединенной с источником генерации воздуха через регулирующий вентиль, а термическую печь – к электрической сети. После разогрева термической печи до температуры, равной 10–30 % температуры плавления изделия, подвергающегося упрочнению, в нее помещают последнее, которое выдерживают в течение времени выдержки, равного не менее 1,6 мин на один миллиметр наибольшего размера упрочняемого изделия. Затем разогретое изделие перемещают в резонансную камеру через выходной канал, производят наладку установки, для чего регулируемую заслонку устанавливают на размер  $C_1$  и фиксируют. После этого осуществляют подачу воздуха в камеру сглаживания пульсаций воздуха через регулирующий вентиль системы от источника генерации воздуха. При этом в резонансной камере давление и объем подающего воздуха, которые создаются за счет фиксации в камере сглаживания пульсаций воздуха величины подающего давления в диапазоне от 1,5 до 2,0 бар, контролируемого при помощи манометра, часового потребления воздуха на первом цикле упрочнения в объеме 2,5–2,9 м<sup>3</sup> и настройки регулирующей заслонки на размер  $C_1$ , а также щелевого сопла, образуют звуковое давление и частоту звукового поля в диапазоне 140–800 Гц, которые позволяют обеспечивать входение в резонанс боковых стенок резонансной камеры. При таких режимах в резонансной камере получают звуковое давление и частоту звукового поля, необходимые и достаточные для осуществления процесса перераспределения дислокаций.

Первый цикл упрочнения осуществляют в течение времени, равного 30–40 % от времени выдержки. Затем наступает второй цикл упрочнения, заключающийся в выдержке упрочняемого изделия в термической печи в течение времени выдержки, как и в первом цикле. После этого разогретое изделие перемещается в резонансную камеру через выходной канал, который перестраивают на размер  $C_2$ , что позволяет на 70–80 % увеличить часовое потребление воздуха по сравнению с потреблением воздуха в первом цикле упрочнения. На втором цикле в резонансную камеру через камеру сглаживания пульсаций воздуха подается воздух при давлении от 1,5 до 2,0 бар, что и на первом цикле, а процесс упрочнения на втором цикле осуществляют в течение времени, равно-

го 20–30 % от времени выдержки. Осуществив два цикла упрочнения, производят сначала первый цикл старения, для чего упрочненное изделие помещают в термическую печь, температуру которой доводят до (150–170) °С, и выдерживают при такой температуре в течение времени, равного времени выдержки, с последующим охлаждением на воздухе до полного остывания. Затем по аналогии выполняют второй цикл старения.

Исследование акустических характеристик установки, реализующей метод АДУ (рис. 1), осуществлено с учетом науки о вибродиагностике. В качестве измерительного оборудования использовался двухканальный цифровой виброанализатор сигналов СД-21, способный осуществлять спектральный анализ сигналов, анализ огибающей случайной высокочастотной составляющей вибрации, отображение и запоминание временных сигналов (режим осциллографа), измерение амплитуд и фаз вибрации на частотах. Сигналы к виброанализатору передавались через 16-канальный адаптер вибропреобразований ICP АВП-16 icp-2 и адаптер интерфейса USB-RS-232.

Измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) производилось в режиме переменных частот «разгон – выбег». Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью компьютерной программы VIBRO-12, позволяющей хранить, просматривать и анализировать результаты АЧХ. Измерение и обработка частотных характеристик полосовых фильтров при измерениях вибрации выполнялись по ИСО 2954–2014 [8].

Задачами экспериментального исследования параметров и характеристик установки для АДУ являлись: получение экспериментальных характеристик АЧХ вибрационного процесса в резонаторе; осуществление сравнительного анализа экспериментальных данных и расчетных зависимостей; выводы. При проведении экспериментальных исследований в качестве вариационных параметров рассматривались давление и расход воздуха, размеры выходного канала (в пределах размеров длины окна). Эффективность работы установки для АДУ оценивалась по величине создаваемых частот и амплитуд колебаний, а также величинам создаваемого энергетического импульса. Для анализа величин амплитуд как в низко-, так и в высокочастотных областях измеряли вибропере-

мещения, виброскорости и виброускорения. Первоначально для визуальной оценки спектра колебаний в связи с тем, что вся совокупность пиков и их соотношения являлись видимыми, анализ производился в децибелах. Далее для определения абсолютных величин амплитуд амплитудно-частотные кривые анализировали в микрометрическом масштабе.

Измерение амплитуды вибраций осуществлялось в виде среднеквадратического значения (СКЗ) амплитуды, равного квадратному корню из среднего квадрата амплитуды колебания. СКЗ является важной характеристикой амплитуды вибраций, так как применяется во всех расчетах, относящихся к мощности и энергии колебаний. Измерения амплитуды в виде Пик (максимальное отклонение от нулевой точки) и Пик-Пик (размах между положительными и отрицательными пиками) производились в случаях предварительного сравнения и анализа амплитуд.

Общий вид установки для АДУ с датчиками измерения вибраций, установленными на стенках (а) и внутри (б) камеры, показан на рис. 2. На корпусе нарисована схема с указанием расположения точек, в которых измерялись АЧХ.

Расположение контрольных точек на стенке корпуса камеры для АДУ выбиралось на линиях, проведенных от точки 1 (рис. 2а), соответствующей центру камеры, через  $45^\circ$  и на некотором расстоянии от точки 1. Такая схема расположения контрольных точек выбиралась для получения максимальной информации при минимальном количестве измерений. Измеренные амплитуды пересчитывали для каждого опыта

с учетом того, что максимальные амплитуды колебаний соответствовали точке 1.



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки для метода аэродинамического упрочнения с датчиками измерения вибраций на стенках (а) и внутри камеры (б)  
Fig. 2. External view of experimental unit for aero-dynamic strengthening method with vibration measuring devices on walls (a) and inside of chamber (b)

Предварительные экспериментальные замеры частот и амплитуд на стенках и внутри камеры в указанных точках показали, что наиболее эффективными являются режимы упрочнения: первый – при подаче воздуха в устройство для АДУ с давлением 2 атм и расходом  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; второй – при том же давлении и расходе  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Амплитудно-частотные характеристики, полученные с датчика измерения вибраций в точке 1 корпуса на первом (рис. 3а) и втором (рис. 3б) режимах и измеренные в виде СКЗ, представлены на рис. 3.

Данные частотных и амплитудных значений для каждой из пяти первых мод, а также добротности  $Q$  (запасенная в резонаторе энергия) при каждой моде приведены в табл. 1.

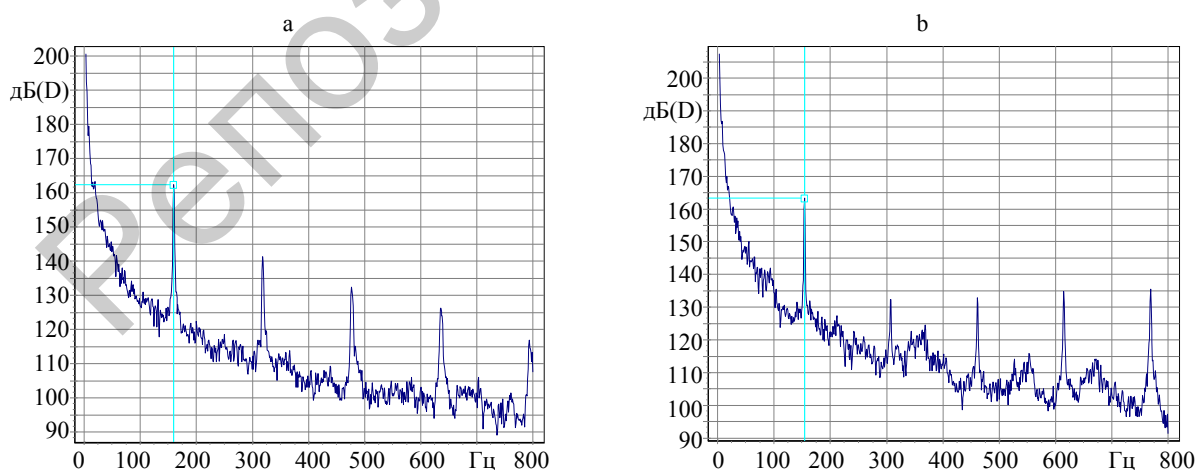


Рис. 3. Спектр амплитудных перемещений, измеренных в виде среднеквадратических значений в точке 1 (рис. 2а) корпуса при различных частотах колебаний на первом (а) и втором (б) режимах упрочнения

Fig. 3. Spectrum of amplitude movement measured in the form of mean-square values at point 1 (fig. 2a) of body at various oscillation frequencies during first (a) and second (b) strengthening modes

**Значения частот и амплитуд для пяти мод на первом и втором режимах в центре колеблющейся стороны корпуса в точке 1 (рис. 2а) камеры**  
**Values of frequency and amplitude for 5 modes in the centre of vibrating body side at point 1 (fig. 2a) of chamber during first and second regimes**

№ моды	Первый режим			Второй режим			Отношение на режимах		
	Частота, Гц	Амплитуда, мкм	Добротность	Частота, Гц	Амплитуда, мкм	Добротность	частоты, %	амплитуды, %	добротности
1	159	130,73	3250	148	65,85	2440	107,4	198,5	133,2
2	318	11,67	290	296	9,12	338	107,4	128,0	85,8
3	477	4,14	103	444	1,87	40	107,4	221,4	257,5
4	636	2,06	51	593	1,03	38	107,3	209,7	134,2
5	794	0,71	18	741	0,59	22	107,2	120,3	81,8

Анализ АХЧ перемещений показывает, что с увеличением частоты уровень амплитуд уменьшается. При этом на первом режиме имеется ряд явно выраженных пиков на частотах 159, 318, 477, 636 и 794 Гц, соответствующих волновым модам № 1, 2, 3, 4 и 5, при которых происходит значительное увеличение резонансных амплитуд. Резонансные амплитуды на втором режиме возникают на частотах 148, 269, 444, 593 и 740 Гц. Из пяти мод частот на первом и втором режимах наиболее выражены первые моды колебаний. Добротность на первом и втором режимах в точке 1 имеет максимальное значение ( $Q = 3268$  и соответственно  $2634$ ) на первой моде.

Сравнение АЧХ и добротностей на первом и втором режимах показывает, что первый режим является высокочастотным, энергоемким и имеет более высокую добротность на эффективной моде (первой) по сравнению со вторым режимом. Так, наблюдается увеличение частоты на 107,4 %, амплитуды – на 198,5, добротности – на 133,2 %, при этом энергоемкость повышается в 4,55 раза. Значения виброускорений, измеренные в режиме СКЗ на корпусе установки для АДУ в точке 8 (рис. 2а) на втором режиме упрочнения, представлены на рис. 4, а расшифровки таких спектров виброускорений – в табл. 2.

При методе АДУ практически на всех режимах обработки между основными модами возникают также резонансные моды с 1/2 периода. Как видно из рис. 4, на промежуточных частотах, соответствующих 1/2 периода основных мод резонансных частот, присутствуют также резонансные амплитуды, но величины этих амплитуд значительно (в 3,3–24,6 раза) меньше по сравнению с амплитудами основных мод.

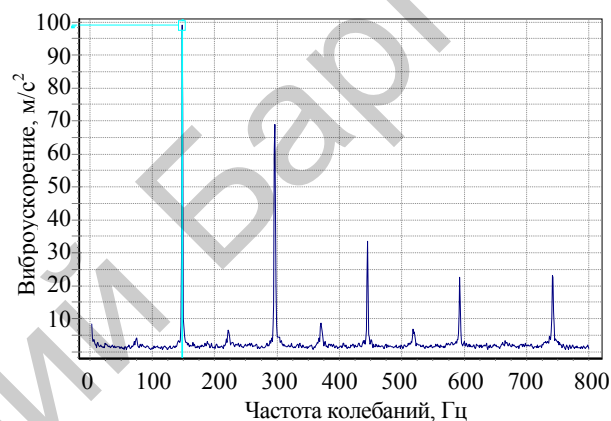


Рис. 4. Спектр амплитудных виброускорений в точке 8 (рис. 2а) на корпусе установки при осуществлении метода аэродинамического упрочнения в зависимости от частоты колебаний на втором режиме

Fig. 4. Spectrum of amplitude vibratory acceleration at point 8 (fig. 2a) on unit body while using aerodynamic strengthening method due to oscillation frequency during the second regime

Таблица 2

**Значения частот и амплитуд виброускорений для пяти основных и пяти промежуточных мод на втором режиме в точке 8 (рис. 2а)**

**Values of frequency and amplitude for 5 basic and 5 intermediate modes at point 8 during second regime (fig. 2a)**

№ моды	Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>	Отношение амплитуды основной моды к промежуточной
0,5	75	4,03	
1	148	98,99	24,6
1,5	222	6,46	
2	297	68,91	10,7
2,5	370	8,81	
3	445	33,43	3,8
3,5	518	6,89	
4	593	22,61	3,3
4,5	666	3,33	
5	741	22,99	6,9

Следовательно, на основных модах энергия воздействия гораздо выше, чем на промежуточных. Если сравнивать отношения амплитуд на модах № 1/№ 0,5; № 2/№ 1,5 (табл. 2) и т. д., то видно, что самое значительное увеличение амплитуды происходит в пределах первых двух мод, где отношение основной моды (№ 1) к промежуточной (№ 0,5) равно 24,6. Это также подтверждает эффективность энергетического воздействия на первой моде.

Для исследования влияния частоты внешнего воздействия при упрочнении методом АДУ на стойкость твердосплавных пластин на частотах 130, 140, 148, 156 и 160 Гц были обработаны три вида твердосплавных пластин PNUA-110408 (ГОСТ 19064–80 [9]) сплавов ВК8, Т5К10 и Т15К6. Настройка на данные частоты осуществлялась за счет изменения площади  $S_k$  выходного канала установки на рис. 1 (размера  $C$ ) при одинаковом давлении подающего воздуха, равном 2 атм. Для этого в точке 1 (рис. 2а) производили замеры частот при вариации размеров выходного канала установки для АДУ. Данные приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения частот на первых модах в точке 1 (рис. 2а)

Values of frequency for first modes at point 1 (fig. 2a)

№ опыта	1	2	3	4	5	6
Длина выходного канала $C$ , м	0,063	0,076	0,082	0,128	0,145	0,157
Площадь выходного канала $S_k$ , м <sup>2</sup>	0,010	0,012	0,013	0,020	0,023	0,025
Частота в точке 1 (рис. 2а) корпуса, Гц	178	165	159	148	139	130

Затем упрочненными методом АДУ твердосплавными пластинами производили фрезерование образцов размерами 70×48 мм из стали 40Х фрезой ф63 мм (5 зубьев) на фрезерно-карусельном станке ГФ211 на режимах: скорость резания  $v = 124,6$  м/мин; подача на зуб  $S_z = 0,13$  мм/зуб; глубина резания  $t = 1,0$  мм; подача стола  $S_c = 500$  мм/мин (0,1977 об/мин). По истечении 30 мин обработки на пластинах измеряли величину износа по задней поверхности  $h_z$ . Результаты исследований в виде гистограммного изображения представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, для каждого сплава имеются такие значения частот, упрочнение на которых позволяет значительно снизить величину износа по задней поверхности. Эти частоты соответствуют частотам, на которых происходит возникновение явления резонанса на первой моде.

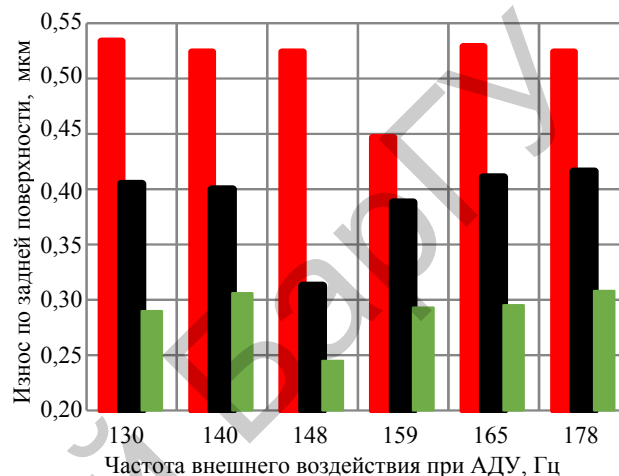


Рис. 5. Гистограммное изображение зависимости износа по задней поверхности  $h_{z,n}$  твердосплавных пластин PNUA-110408, упрочненных методом аэродинамического упрочнения, от частоты:

■ – ВК8; ■ – Т5К10; ■ – Т15К6

Fig. 5. Histogram image of dependence for flank wear  $h_{z,n}$  of hard alloy plates PNUA-110408 strengthened while using aero-dynamic strengthening method on frequency:

■ – ВК8; ■ – Т5К10; ■ – Т15К6

Так, при упрочнении сплава ВК8 на резонансной частоте 159 Гц износ пластин по задней поверхности после 30 мин обработки составляет 0,447 мм, тогда как при упрочнении на частотах 130, 140, 156 и 160 Гц, на которых отсутствует явление резонанса системы, износ твердосплавных пластин ВК8 составляет 0,524–0,529 мм. Для твердых сплавов Т5К10 и Т15К6 такое же явление наблюдается на частоте 148 Гц, упрочнение на которой позволяет достичь для сплава Т5К10 величины износа 0,313 мм по сравнению с износом после упрочнения пластин на других частотах, равным 0,400–0,412 мм, и для сплава Т15К6 – 0,245 мм, по сравнению с 0,290–0,306 мм. Результаты эксперимента подтверждают, что при упрочнении методом АДУ на резонансных частотах происходит повышение износо-

стойкости твердосплавных пластин по истечении 30 мин работы на 20–40 %, а сам метод АДУ является эффективным механизмом, изменяющим свойства твердых сплавов, работающих с ударными нагрузками.

Зависимости износа по задней поверхности пластин, упрочненных методом АДУ, от частоты внешнего воздействия, построенные в виде линейных кривых, изображены на рис. 6.

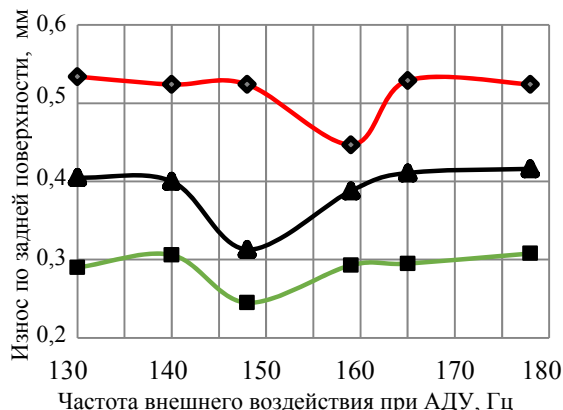


Рис. 6. Зависимость износа по задней поверхности  $h_{3,н}$  твердосплавных пластин PNUA-110408, упрочненных методом аэродинамического упрочнения, от частоты:

—◆— BK8; —▲— T5K10; —■— T15K6  
 Fig. 6. Dependence for flank wear  $h_{3,н}$  of hard alloy plates PNUA-110408 strengthened while using aerodynamic strengthening method on frequency  
 —◆— BK8; —▲— T5K10; —■— T15K6

Из рис. 6 видно, что кроме уменьшения износа пластин, упрочненных АДУ на частоте 148 Гц, наблюдается уменьшение износа пластин, упрочненных на частоте 159 Гц. В то же время интенсивность износа пластин различна. Это явление можно объяснить тем, что ширина резонансного спектра на частоте 148 Гц частично перекрывает ширину резонансного спектра на частоте 159 Гц, и в поле

пересечения данных спектров могут появиться эффекты, связанные с повышением стойкости, свойственные частотам в диапазоне спектра 148 и 156 Гц.

Для экспериментального определения коэффициента затухания  $\delta$ , используемого в работе резонатора, осуществляли замеры АЧХ на корпусе и внутри камеры. Расчеты коэффициента затухания выполняли по формуле [10]

$$\delta = k_{\delta} \ln \left( \frac{A_0}{A_L} \right), \quad (1)$$

где  $A_0, A_L$  – амплитуда звукового давления на стенке камеры и на расстоянии  $L$  соответственно, мкМ;  $k_{\delta} = \frac{1}{L}$  – коэффициент, учитывающий расположение изделия в камере;  $L$  – расстояние от вибрирующей стенки камеры до точки, расположенной между стенками камеры, м.

Были выбраны три экспериментальные точки замера внутри камеры – В-1, В-2, В-3. Эти точки располагались между вибрирующими стенками камеры на расстоянии  $L$  и на высоте, эквивалентной точкам 1, 3, 8 на рис. 2а. Данные замеров и расчетов представлены в табл. 4. Из нее видно, что для экспериментального резонатора, реализующего метод АДУ, усредненный коэффициент затухания  $\delta$  при обработке твердых сплавов для первого режима равен 75, для второго – 57.

Коэффициент затухания  $\delta$  влияет на величину резонансной амплитуды (рис. 7). Кривые, построенные по формуле (1) при  $\delta_1 = 40, \delta_2 = 57, \delta_3 = 75$  и  $\delta_4 = 110$ , свидетельствуют о том, что при уменьшении  $\delta$  резонансная амплитуда увеличивается, и наоборот.

Таблица 4

Данные замеров и расчетов для определения коэффициента затухания резонатора  
 Measurement and calculation data for determination of resonator damping coefficient

№ точки		L, м	Первый режим			Второй режим		
Внутри камеры	На корпусе		$A_0$ , мкМ	$A_L$ , мкМ	$\delta$	$A_0$ , мкМ	$A_L$ , мкМ	$\delta$
В-1	3	0,050	108,40	2,74	73,6	52,72	2,95	57,7
В-2	1	0,075	130,73	0,41	76,9	65,85	0,98	56,1
В-3	8	0,075	103,88	0,39	74,5	114,45	1,55	57,4
Среднее значение					75,0			57,0

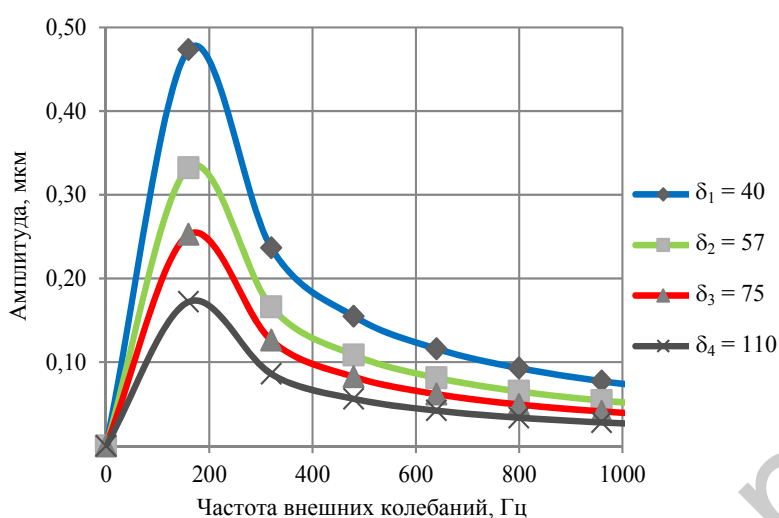


Рис. 7. Зависимость резонансной амплитуды от частоты внешних воздействий и коэффициента затухания

Fig. 7. Dependence of resonance amplitude on frequency of external action and damping coefficient

## ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты подтверждают резонансный фактор энергетического воздействия при методе аэродинамического упрочнения.

2. Для упрочнения разработанным методом твердых сплавов определены два наиболее эффективных режима обработки: первый – при подаче воздуха в устройство с давлением 2 атм и часовым расходом  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; второй – при том же давлении и расходе  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

3. На первом режиме имеется ряд явно выраженных резонансных пиков амплитуд на частотах 159, 318, 477, 636 и 794 Гц. Резонансные амплитуды на втором режиме возникают на частотах 148, 269, 444, 593 и 740 Гц.

4. Из пяти мод частот на первом и втором режимах наиболее выражена первая мода колебаний. Добротность на обоих режимах в центральной точке камеры имеет максимальные значения ( $Q = 3268$  и  $2634$ ) на первой моде.

5. Первый режим является высокочастотным, энергоемким и имеет более высокую добротность на эффективной моде (первой) по сравнению со вторым режимом. На первом режиме наблюдается увеличение частоты на 107,4 %, амплитуды – на 198,5, добротности – на 133,2 %, энергоемкость повышается в 4,55 раза.

6. При методе аэродинамического упрочнения практически на всех режимах обработки между основными модами возникают резонансные моды с  $1/2$  периода, но величины этих амплитуд значительно (в 3,3–24,6 раза) меньше амплитуд основных мод. На основных модах энергия воздействия выше, чем на промежуточных, более чем в 24 раза.

7. При упрочнении данным методом на резонансных частотах происходит повышение износостойкости твердосплавных пластин по истечении 30 мин работы на 20–40 %, а сам метод является эффективным механизмом, изменяющим свойства твердых сплавов, работающих с ударными нагрузками.

8. Для экспериментального резонатора, реализующего метод аэродинамического упрочнения, усредненный коэффициент затухания  $\delta$  при обработке твердых сплавов для первого режима равен 75, для второго – 57. Коэффициент затухания влияет на величину резонансной амплитуды.

## ЛИТЕРАТУРА

- Северденко, В. П. Обработка металлов давлением с ультразвуком / В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. Минск: Наука и техника, 1973. 286 с.

2. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. 2-е изд. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 726 с.
  3. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. 21049 Респ. Беларусь; МПК C21D8/00 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков; дата публ. 30.06.2017.
  4. Жигалов, А. Н. Прогрессивные технологии для процессов резания с ударами / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Прогресивні технології машинобудування: матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. Львів-Карпати, 5–10 лютого 2018 р. Львов, 2018. С. 47–49.
  5. Жигалов, А. Н. Адаптивное управление при совмещенной обработке резанием и ППД / А. Н. Жигалов. Могилев: МГУП, 2013. 236 с.
  6. Жигалов, А. Н. Влияние износа твердых сплавов, упрочненных аэродинамическим воздействием, на шероховатость обработанной поверхности при фрезерно-карусельном резании / А. Н. Жигалов // Вестник Белорусско-Российского университета. 2017. Т. 56, № 3. С. 5–15.
  7. Жигалов, А. Н. Влияние аэродинамического звукового упрочнения на предел прочности при изгибе и твердость твердых сплавов / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 26–27 апр. 2018 г.; Белор.-Рос. ун-т. Могилев, 2018. С. 131–132.
  8. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Требования к средствам измерений: ГОСТ ISO 2954–2014. Введ. 01.11.2015. М.: Стандартиформ, 2015. 15 с.
  9. Пластины режущие сменные многогранные твердосплавные пятигранной формы с отверстием. Конструкция и размеры: ГОСТ 19064–80. Введ. 01.01.1982. М.: Стандартиформ, 2006. 5 с.
  10. Справочник. Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М. Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- Поступила 31.05.2018  
Подписана в печать 06.08.2018  
Опубликована онлайн 30.01.2019

#### REFERENCES

1. Severdenko V. P., Klubovich V. V., Stepanenko A. V. (1973) *Metal Treatment Under Pressure with Ultrasound*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 286 (in Russian).
2. Bergman L. (1954) *Der Ultraschall und Seine Anwendung in Wissenschaft und Technik* [Ultrasound and its Application in Science and Technology]. Zurich. 748 (in German).
3. Jigalov A. N., Shaturov G. F., Golovkov V. M. (2017) *Method for Aerodynamic Strengthening of Parts*. Patent No 21049 Republic of Belarus (in Russian).
4. Jigalov A. N., Sheleg V. K. (2018) Advanced Technologies for Cutting Processes with Impacts. *Progresivni Tekhnologii Mashinobuduvanni: Materialy VII Mizhnar. Nauk.-Tekhn. Konf., L'viv-Karpati, 5–10 Lyutogo 2018 r.* [Advanced Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of 7<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference, Lviv-Karpaty, Febr. 5–10, 2018], 47–49 (in Russian).
5. Jigalov A. N. (2013) *Adaptive Control in Case of Combined Machining Operation and Surface Plastic Deformation*. Mogilev, Mogilev State University of Food Technologies. 236 (in Russian).
6. Jigalov A. N. (2017) Effect of Wear of Aerodynamically Strengthened Hard Alloys on Roughness of Processed Surfaces During Milling-Rotary Cutting. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], 56 (3), 5–15 (in Russian).
7. Jigalov A. N., Zholobov A. A. (2018) Effect of Aerodynamic Sound Strengthening on Bending Value and Hardness of Hard Alloys. *Materialy, Oborudovanie i Resurso-sberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 26–27 apr. 2018 g.* [Materials, Equipment and Resource Saving Technologies: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Apr. 26–27, 2018]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 131–132 (in Russian).
8. State Standard ISO 2954–2014. *Vibration. Control Over Vehicle Conditions According to Vibration Measured Values for Non-Rotating Parts. Requirements to Measuring Tools*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 15 (in Russian).
9. State Standard 19064–80. *Cutting Replaceable Polyhedral Hard-Carbide Plates of Pentagonal Shape with Opening. Design and dimensions*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 5 (in Russian).
10. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskii A. M., Brodov M. E., Bystrov M. V., Grigor'ev I. S., Meilikhov E. Z. (ed.) (1991) *Reference Book. Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).

Received: 31.05.2018

Accepted: 06.08.2018

Published online: 30.01.2019