

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 213 с.
2. Кубраков, И. В. Влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на твердосплавные пластины ВУТС PNEA 110408 с покрытием TiN при обработке высокопрочного чугуна ВЧ50 / И. В. Кубраков, М. В. Башаримов, А. Н. Жигалов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апреля 2025 г. – Могилев, 2025. – С. 130–131.
3. Жигалов, А. Н. Предпосылки создания в Республике Беларусь производства твердосплавного инструмента / А. Н. Жигалов, А. Ю. Поляков, М. В. Башаримов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2022. – С. 217–228.
4. Аксенович, Л. А. Физика в средней школе / Л. А. Аксенович, В. И. Зенькович, К. С. Фарино. – Минск: Аверсэв, 2010. – 1102 с.
5. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов: учебник для вузов / В. С. Золоторевский. – М.: Metallurgia, 1983. – 352 с.
6. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
7. Гуляев, А. П. Материаловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев. – М.: Metallurgia, 1986. – 544 с.
8. Яковлев, Ю. С. Гидродинамика взрыва / Ю. С. Яковлев. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 313 с.
9. Физика ядерного взрыва / Под ред. В. М. Лоборева. – М.: Министерство обороны РФ, ЦФТИ, 1997. – С. 33.
10. Улитенок, А. О. Влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на твердость чугуна / А. О. Улитенок // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 146–147.

## REFERENCES

1. Zhigalov A. N., Sheleg V. K. *Teoreticheskie osnovy aerodinamicheskogo zvukovogo uprochneniya tverdosplavnogo instrumenta dlya processov preryvistogo rezaniya* [Theoretical foundations of aerodynamic sound hardening of carbide tools for intermittent cutting processes]. Mogilev, MGUP Publ., 2019, 213 p.
2. Kubrakov I. V., Basharimov M. V., Zhigalov A. N. Vliyanie metoda aerodinamicheskogo zvukovogo uprochneniya na tverdosplavnye plastiny BYTC PNEA 110408 s pokrytiem TiN pri obrabotke vysokoprochnogo chuguna VCH50 [Effect of Aerodynamic Sound Hardening on TiN Coated BYTC PNEA 110408 Carbide Plates in High Strength Cast Iron Processing VCh50]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*, Mogilev, April 24–25, 2025, Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2025, pp. 130–131.
3. Zhigalov A. N., Polyakov A. Yu., Basharimov M. V. Predposylki sozdaniya v Respublike Belarus' proizvodstva tverdosplavnogo instrumenta [Prerequisites for the creation in the Republic of Belarus of the production of carbide tools]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov, sb. nauchnykh trudov = Modern methods and technologies for creating and processing materials. Collection of scientific papers*, Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2022, pp. 217–228.
4. Aksenovich L. A., Zen'kovich V. I., Farino K. S. *Fizika v srednej shkole* [Physics in high school]. Minsk, Aversev Publ., 2010, 1102 p.
5. Zolotarevskij V. S. *Mekhanicheskie svoystva metallov: uchebnik dlya vuzov* [Mechanical properties of metals. Textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 352 p.
6. Lahtin Yu. M., Leont'eva V. P. *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials science. Textbook for universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 528 p.
7. Gulyaev A. P. *Metallovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Metal science. Textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 544 p.
8. Yakovlev Yu. S. *Gidrodinamika vzryva* [Explosion hydrodynamics]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1961, 313 p.
9. *Fizika yadernogo vzryva* [Physics of a nuclear explosion]. Moscow, Ministerstvo oborony RF, CFIT Publ., 1997, vol. 2, pp. 33.
10. Ulitenok A. O. Vliyanie metoda aerodinamicheskogo zvukovogo uprochneniya na tverdost' chuguna [Effect of aerodynamic sound hardening method on cast iron hardness]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 146–147.



## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. О. УЛИТЁНОК, г. Могилев, Беларусь. E-mail: alexulinok@yandex.ru

### Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [1]

Метод АДУ состоит в том, что после предварительного нагрева до температуры 300–320 °С, последующего звукового воздействия посредством резонансных акустических волн частотой 140–170 Гц с высоким временем воздействия 1–3 мин и низким уровнем плотности потока энергии 0,25–0,43 Вт/м<sup>2</sup> с интенсивностью звука до 126 дБ достигаются резонансные амплитуды атомов W, Ti, Co, равные соответственно 38, 68, 75 мкм. Это приводит к смещению указанных атомов из узлов кристаллической решетки твердого сплава (ТС) и снижению «...дефектности кристаллической структуры и плотности дислокаций...», которая фиксируется дальнейшим нагревом до 160 °С с одночасовой выдержкой [1].

Генерация акустических волн осуществляется в установке АДУ посредством подачи в нее сжатого воздуха под давлением 0,1–0,20 МПа. Схема генерации акустических волн в установке АДУ показана на рис. 1, а общий вид установки АДУ – на рис. 2.

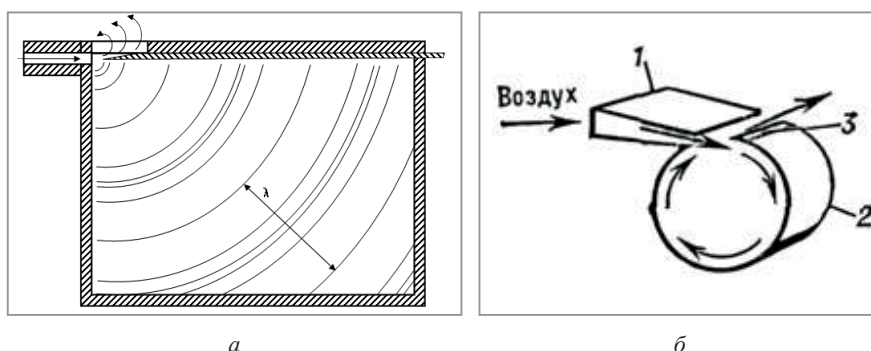


Рис. 1. Схема генерации звука в установке АДУ:

а – акустическая схема установки АДУ; б – акустическая схема прототипа установки АДУ-свистка [2]



Рис. 2. Общий вид установки АДУ [1]: 1 – резонатор; 2 – ресивер; 3 – подвижный клин

Режимы звукового воздействия и спектры звука при АДУ показаны на рис. 3 и приведены в табл. 1.

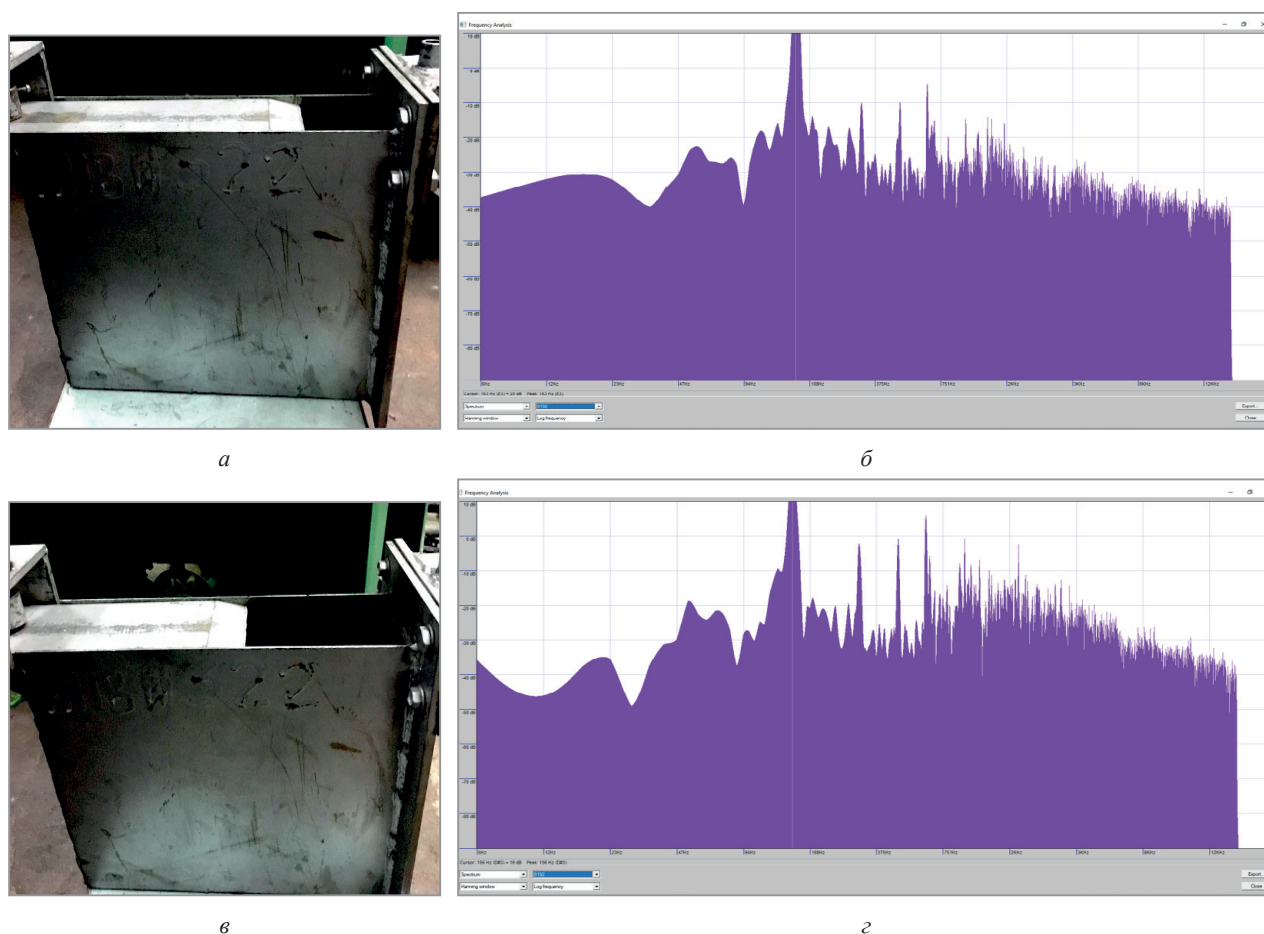


Рис. 3. Режимы звукового воздействия и спектры звука при АДУ

Таблица 1. Режимы и спектры звука АДУ

| Частота, Гц | Уровень звука, дБ |
|-------------|-------------------|
| Режим 1     |                   |
| 163         | 25                |
| 325         | –10               |
| 488         | –10               |
| 651         | –4                |
| Режим 2     |                   |
| 156         | 19                |
| 314         | –2                |
| 471         | 0                 |
| 627         | 5                 |
| 941         | –4                |
| 1843        | –1                |

Сопоставляя рис. 1, а с 1, б, а также анализируя спектры звука, полученные посредством записи звука на каждом из режимов на удалении 5 м от работающей установки АДУ и дальнейшей визуализации аудиозаписей, можно сделать вывод о крайне малой эффективности этой установки с точки зрения генерирования главного низкочастотного (в диапазоне 140–170 Гц) тона, который, по мнению разработчиков [1], оказывает резонансное воздействие на атомы кристаллической решетки твердого сплава. Низкая эффективность обусловлена тем, что значительная часть воздушной струи тратится на генерацию практически белого шума в связи с отсутствием в установке АДУ из-за угловатости ее формы, вихря, благодаря которому возникает практически однотональный звук, как в свистке [2]. Поэтому установка АДУ – это несовершенный малоэффективный свисток.

### Математический анализ физико-математической модели амплитуды резонанса

Амплитуда резонанса  $A_{\text{рез}}$  представлена формулой (2.26) [1]:

$$A_{\text{рез}} = F_0 / (2 m \delta \omega_1), \quad (1)$$

где  $A_{\text{рез}}$  – резонансная амплитуда, м;  $\omega_1$  – частота внешних колебаний,  $\text{с}^{-1}$ ;  $F_0$  – внешняя сила, Н;  $m$  – масса атома, кг;  $\delta$  – коэффициент затухания.

В формуле (1) выражение  $F_0 / (2 m \delta)$  фактически является постоянной величиной, характерной для конкретного компонента твердого сплава (W, Co или Ti). Ее в настоящей работе обозначили коэффициентом компонента  $K_{\text{комп}}$ :

$$F_0 / (2 \cdot m \cdot \delta) = K_{\text{комп}}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$A_{\text{рез}} = K_{\text{комп}} \omega_1. \quad (3)$$

Видно, что формула (3), а значит и (2.26) [1], является обратной функцией, график которой, согласно курсу школьной математики, является гиперболой, не имеющей ни максимумов, ни минимумов [3, 4]. В работе [1] указано, что на основании вычислений по формуле (2.26) были построены графики амплитуд W, Ti, Co кристаллической решетки твердого сплава (рис. 4). На рисунке также построен пунктирной линией, соответствующий действительности, вид зависимости (2.26) [1].

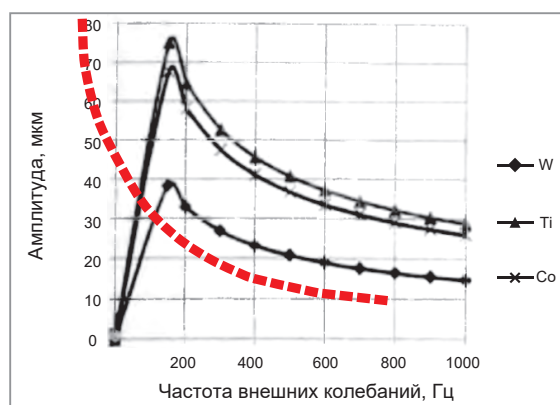


Рис. 4. «Рисунок 2.5. Зависимости резонансной амплитуды  $A_{\text{рез}}$  от частоты  $\omega_1$  внешних колебаний атомов W, Ti, Co» построены по формуле (2.26) [1]. Пунктиром – соответствующий действительности вид зависимости (2.26) [1], как обратной функции

Очевидно, что утверждение в работе [1] о том, что на основании вычислений по формуле (2.26) были построены графики амплитуд W, Ti, Co в работе [1] не соответствует действительности и, следовательно, **недостовечно**.

Так как формула (2.26) [1] является обратной функцией, а обратная функция не имеет максимума, то утверждения о том, что формула (2.26) [1] описывает явление резонанса и существует резонанс амплитуд атомов W, Ti, Co **недостоверны**.

### Графоаналитический анализ $A_{\text{рез}} = f(\omega_1) = K_{\text{комп}} / \omega_1$

Правые части графиков на рис. 2.5 [1] похожи на гиперболы, поэтому произвели графоаналитический анализ  $A_{\text{рез}} = f(\omega_1) = K_{\text{комп}} / \omega_1$ . Для этого по формуле  $K_{\text{комп}} = \omega_1 \cdot A_{\text{рез}}$  рассчитали коэффициенты компонента W для частот 200 и 500 Гц и компонента Co для частот 400 и 700 Гц, взяв из соответствующих графиков амплитуды, соответствующие указанному компонентом и частотам, 33, 20, 40 и 30 мкм.

И далее были построены графики зависимостей амплитуды от частоты (см. рис. 2), выполнив расчеты по формулам:

$$K_{W200} = 200 \cdot 33 = 6600, K_{W500} = 500 \cdot 20 = 10000,$$

$$K_{Co400} = 400 \cdot 40 = 16000, K_{Co700} = 700 \cdot 30 = 21000,$$

$$A_{W200} = K_{W200} / \omega = 6600 / \omega, \quad (4)$$

$$A_{W500} = K_{W500} / \omega = 10000 / \omega, \quad (5)$$

$$A_{Co400} = K_{Co400} / \omega = 16000 / \omega, \quad (6)$$

$$A_{Co700} = K_{Co700} / \omega = 21000 / \omega. \quad (7)$$

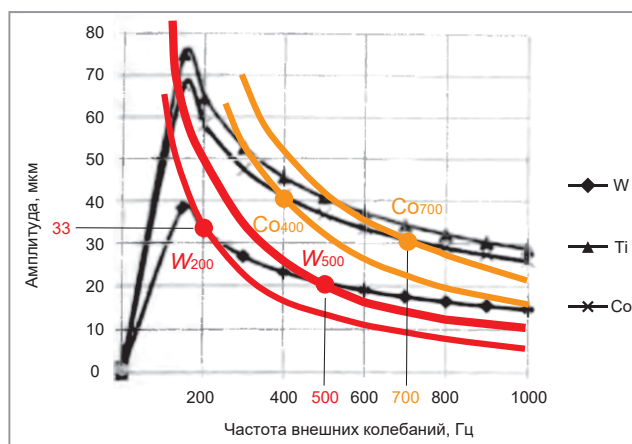


Рис. 5. Графоаналитический анализ  $A_{рез} = f(\omega_1) = K_{комп}/\omega_1$

Из рис. 2 видно, что все графики, построенные по формулам (4)–(7), которые, с одной стороны, эквивалентны формуле (2.26) [1], а с другой – они не ложатся даже на правые части соответствующих графиков на рис. 2.5 [1] (рис. 5). Откуда следует, что все графики на рис. 2.5 [1] **недостовверны**.

### Размерный анализ [3, 5–7] формулы (2.26) [1]

Формула для размерного анализа:

$$A_{рез} = F_o / (2 \cdot m \cdot \delta \cdot \omega_1) \quad (2.26) [1]. \quad (8)$$

Подставим в (8) значение размерностей величин, получим

$$m = H / (кг \cdot с^{-1}) = кг \cdot м \cdot с^{-2} / (кг \cdot с^{-1}) = кг \cdot м \cdot с^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с. \quad (9)$$

В итоге

$$1 = с. \quad (10)$$

Формула (10) ошибочна [3, 5–7], абсурдна по своей сути, не соответствует действительности и поэтому формула (2.26) [1] является **недостовверной**.

### Анализ резонансных амплитуд атомов W, Co, Ti

Согласно рисунку 2.5 [1] (рис. 4, 5), резонансные амплитуды равны соответственно 38, 68, 75 мкм. На рис. 4.23 в работе [1] (рис. 6) представлена микроструктура поверхности образцов твердого сплава. Для анализа соотношений размеров зерен и поля зрения фотографий с резонансными амплитудами в данной работе в масштабе красным цветом нанесены размер поля зрения фотографий и резонансных амплитуд атомов W, Ti, Co.

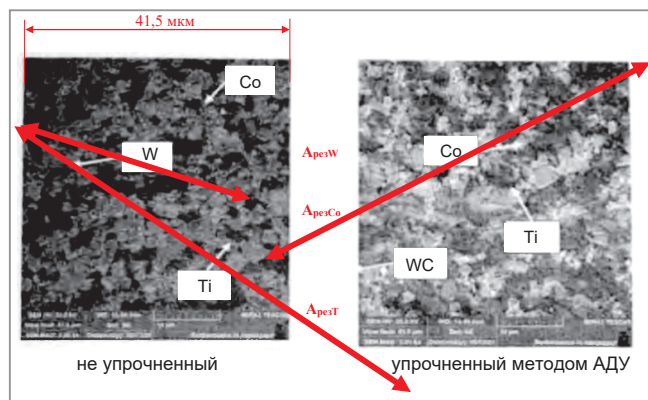


Рис. 6. Анализ амплитуд атомов W, Co, Ti в твёрдом сплаве T5K10.  $\times 5000$

Общеизвестно, что размер зерен фаз в твердом сплаве 2–3 мкм. Очевидно, более чем 10-кратное превышение размеров зерен T5K10 указанными выше резонансными амплитудами, превосходящими даже размер поле зрения фотографий [4]. Также очевидно соответствие заявленных в [1] резонансных амплитуд атомов W, Ti, Co газообразному состоянию твердого сплава, в то время как в работе [1] агрегатное

состояние твердого сплава не меняется. Из всего этого следует, что сведения в работе [1] о таких значительных величинах резонансных амплитуд  $W$ ,  $Ti$ ,  $Co$ , а также сведения вообще о резонансе этих атомов в твердом сплаве **недостовверны**.

### Основа теории АДУ и размерный анализ ее формулы [5–8]

Основа теории АДУ выражена формулой (2.43) [1]:

$$E_{\text{вн}} = \frac{0,5\rho S\omega_{\text{рез}}^2 A_{\text{рез}}^2}{\ln\left(\frac{\delta}{k_{\delta}}\right)} + 24,94m(T_{\text{доп}} + 237,15), \quad (11)$$

где  $E_{\text{вн}}$  – суммарная внешняя энергии, воздействующая на атомы компонентов твердого сплава, при АДУ;  $\rho$  – плотность упрочняемого твердого сплава,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $S$  – площадь атома,  $\text{м}^2$ ;  $\omega_{\text{рез}}$  – резонансная частота,  $\text{с}^{-1}$ ;  $A_{\text{рез}}$  – резонансная амплитуда,  $\text{м}$ ;  $T_{\text{доп}}$  – допустимая температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $(T_{\text{доп}} + 273,15)$  – допустимая температура,  $\text{K}$ ;  $m$  – масса атома,  $\text{кг}$ ;  $24,94 \approx 3R$  (из формулы (2.20) [1]), где  $R$  – газовая постоянная;  $\text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = \text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Знаменатель в первом слагаемом в формуле (1) является безразмерной величиной.

Подставив в (11) значение размерностей величин, получим:

$$\text{Дж} = \text{кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{м}^2\cdot(\text{с}^{-1})^2\cdot\text{м}^2 + \text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{кг}\cdot\text{K}. \quad (12)$$

С учетом того, что  $\text{Дж} = \text{Н}\cdot\text{м} = \text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{м} = \text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$  (12) запишется как:

$$\text{Дж} = \text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{м}^2 + \text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{кг}. \quad (13)$$

В итоге

$$1 = 1/\text{м} + \text{кг}/\text{моль}. \quad (14)$$

Формула (14) ошибочна [5–8], абсурдна по своей сути, не соответствует действительности и поэтому формула (2.43) [1] является **недостовверной**.

### Философский образный анализ [8] формул (2.26) и (2.43) работы [1]

В левых частях (10) и (14) содержится число – 1. Оно соответствует философской категории – количество. А в правых частях (10) и (14) содержатся выражения размерностей каких-то физических величин, имеющие различные качества материи, т. е. соответствует философской категории – качество. В итоге имеем три различных качества, которым для простоты понимания и рассуждений присвоили произвольные образы. Так, качество выраженному в (10) размерностью  $s$  присвоили образ лапша, а качеством, выраженным в (14)  $1/\text{м}$  – шило,  $\text{кг}/\text{моль}$  – мыло. В результате получили следующие образные формулы:

$$\text{для формулы (2.26) [1]} \quad 1 = \text{Лапша}, \quad (15)$$

$$\text{для формулы (2.43) [1]} \quad 1 = \text{Шило} + \text{Мыло}. \quad (16)$$

В работе [1] формулы (2.26) и (2.43) фигурируют как составные части теоретической модели АДУ, описывая целостную ее картину. Тогда, согласно формулам (15) и (16):

$$\text{Лапша} = \text{Шило} + \text{Мыло}. \quad (17)$$

Формулы (15) и (16) противоречат закону философии [8] перехода количества в качество, а формула (17) к тому же абсурдна, поэтому формулы (2.26) и (2.43) **недостовверны** [1].

### Логический образный анализ формул (2.26) и (2.43) работы [1]

Были рассмотрены выражения (15) и (16) формально, без учета их смыслов, только как набор символов, как тезисы – объекты для логического анализа, в которых учитывается только смысл знака «=». Тезис (15) и тезис (16) описывают единую теоретическую модель АДУ, следовательно, должно быть истинно выражение

$$\text{Лапша} = 1 = \text{Шило} + \text{Мыло}. \quad (18)$$

Из законов логики следует ложность выражения (18) в целом, ложность (15), ложность (16) или ложность (15) и (16). Если ложен только один тезис, то рушится целостность теоретической модели

АДУ и последняя тогда ложна. Если ложно выражение (18) в целом или ложно (15) и (16), то теоретическая модель АДУ также ложна. Отсюда следует, что теоретическая модель АДУ ложна, а значит **недоверенна**.

#### Анализ вариантов физико-математических моделей основ теории АДУ

В работе [9] была видоизменена физико-математическую модель АДУ [1], а в работе [10] предложена принципиально иная, чем в [1], физико-математическая модель АДУ. Главным отличием [10] от [1] является высокоэнергетичность резонансных звуковых волн. Так, интенсивность волновой энергии в [10] – 11328–12476 Вт/м<sup>2</sup>, а в [1] – 0,25–0,43 Вт/м<sup>2</sup> [11].

Таблица 2. Сравнительный анализ вариантов физико-математических моделей АДУ

| Источник | Интенсивность волновой энергии, Вт/м <sup>2</sup> | Внешняя энергия от воздействия звука, Дж | Интенсивность звука, дБ | Давление подаваемого воздуха, МПа |
|----------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1        | 0,25–0,43                                         | (2,5–11,1) · 10–18                       | 120–130                 | 0,16–0,2                          |
| 9        | 0,25–0,43                                         | (6,7–9,1) · 10–23                        | 120–130                 | 0,16–0,2                          |
| 10       | 11328–12476                                       | (0,54–2,27) · 10–18                      | >160                    | 0,16                              |

Причем такая значительная волновая энергия в работе [10] была достигнута на той же установке (рис. 7), что и в работе [1] (рис. 2) и при том же давлении подаваемого в установку АДУ воздуха, что и в работе [1].



Рис. 7. Общий вид установки АДУ [10]

К тому же при шуме 160 дБ у человека возникает шок, разрыв барабанных перепонки и легких. Такой шум соответствует ударной волне сверхзвукового самолета. Осуществление какой-либо обработки при таком уровне шума смертельно опасно и не могло осуществляться на практике, поэтому сведения работы [10] о достижении уровня интенсивности волновой энергии (11328–12476) Вт/м<sup>2</sup> не соответствуют действительности и **недоверены**. А работы [9, 10] вместе с [4–7, 12, 13] подтверждают **недоверенность** физико-математической модели и основ теории АДУ, а также **недоверенность** сведений о наличии основ теории АДУ в [1].

#### Об отсутствии изменений плотности дислокации при АДУ

В связи с отсутствием в [1] статистического анализа результатов эксперимента по определению плотности дислокаций в работе [14] был произведен этот анализ. В частности, был выполнен расчет доверительных интервалов плотности дислокаций четырех экспериментальных точек (рис. 8) по данным замеров, взятым из работы [1].

Из рисунка видно, что доверительные интервалы без АДУ и с АДУ перекрываются и для Т5К10 и для ВК8, т. е. статистически значимые изменения плотности дислокаций отсутствуют. В работе [14] был произведен также статистический анализ, полученных в [1] результатов определения параметров

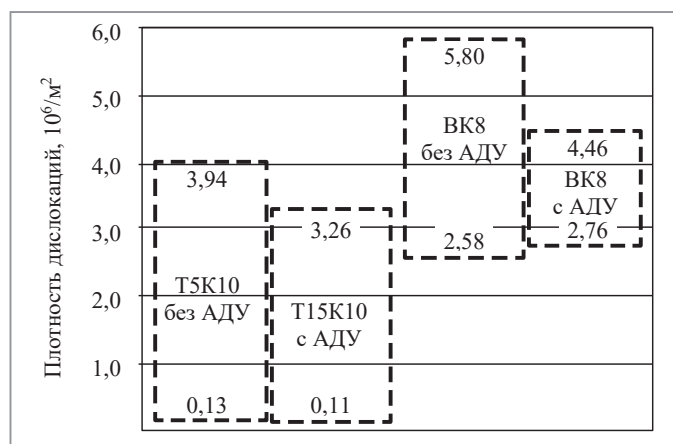


Рис. 8. Доверительные интервалы плотности дислокаций

кристаллических решеток фаз твердого сплава. Анализ показал отсутствие изменений параметров этих решеток. В связи с этим сведения о том, что после обработки методом АДУ уменьшается плотность дислокаций и параметры кристаллической решетки приближаются к идеальной кристаллической решетке недостоверны.

### Об отсутствии изменений механических свойств чугуна после его обработки методом АДУ

Были проведены исследования в ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» по заданию 2.16 «Определение возможности повышения свойств чугуна методом аэродинамического упрочнения» подпрограммы «Металлургия», ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» [3, 15]. Результаты приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что доверительные интервалы всех видов обработки для каждого из механических свойств перекрываются. Из чего следует, что изменения механических свойств отсутствуют.

Таблица 3. Технологии обработки образцов и их механические свойства

| Вид обработки                                                   | Без АДУ     | АДУ-1       | АДУ-2       |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Нагрев до 300 °С, выдержка 30 мин                               | +           | +           | +           |
| Обработка в установке АДУ с частотой ее резонанса 159 Гц, 4 мин | –           | +           | +           |
| Охлаждение на воздухе                                           | +           | +           | +           |
| Нагрев до 300 °С, выдержка 30 мин                               | –           | –           | +           |
| Обработка в установке АДУ с частотой ее резонанса 148 Гц, 4 мин | –           | –           | +           |
| Охлаждение на воздухе                                           | –           | –           | +           |
| Доверительные интервалы значений механических свойств           |             |             |             |
| Твердость HRB                                                   | 93,3–94,3   | 93,6–95,0   | 94,3–95,1   |
| Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>                            | 172,3–183,9 | 178,2–186,4 | 180,4–182,9 |
| Временное сопротивление на растяжение, МПа                      | 264,3–277,6 | 248,1–293,0 | 258,2–297,4 |

Следовательно, можно сделать заключение о том, что сведения в работе [1] об изменении механических свойств твердых сплавов **недостоверны**.

### Анализ механизмов повышения механических свойств твердых сплава при АДУ

В работе [1] содержатся сведения об увеличении удельной вязкости и прочности на изгиб твердого сплава после его обработки методом АДУ. Однако выше было показано, что сведения о теоретической модели недостоверны и что отсутствуют изменения в кристаллической решетке. Тогда встает вопрос, почему же все-таки повышаются указанные механические свойства в твердых сплавах после обработки методом АДУ? Существуют два решения этого вопроса.

1. Механические свойства не изменяются после АДУ, так как сведения об увеличении этих свойств в [1] недостоверны. И это подтверждают результаты НИР в ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» [3, 15].

2. Механические свойства все-таки изменяются после АДУ. Но это происходит не из-за звукового воздействия, а из-за отжига первого рода кобальта в твердом сплаве, т. е. возврата. Однако в работе [1] данные о повышении механических свойств только от термообработки или только от звукового

воздействия отсутствуют. В связи с отсутствием указанных данных, а также в связи с множеством недостоверных сведений в работе [1] можно сделать заключение о том, что сведения в этой работе об увеличении ударной вязкости и прочности на изгиб твердого сплава после его обработки методом АДУ тоже **недостоверны**.

Можно сделать предположение, что сведения об увеличении указанных механических свойств все-таки достоверны и что это увеличение объясняется тем, что изменение механических свойств объясняется возвратным отжигом [5–7, 16–22]. То тогда из этого следует, что под действием термической обработки при АДУ происходит не упрочнение, а разупрочнение металлов и сплавов и поэтому термин «аэродинамическое звуковое упрочнение» не соответствует действительности, т. е. является **недостоверным**.

#### Анализ возможности воздействия звука при АДУ на кристаллическую решетку металлов и сплавов

В работах [4–7, 9, 21–26] научно обоснован вывод о невозможности звука по методу АДУ производить изменения в кристаллической решетке металлов и сплавов, а также динамическое воздействие на них, поэтому сведения в работе [1] о воздействии звука на кристаллическую решетку твердого сплава с последующим смещением атомов и сведения о динамическом воздействии на этот сплав не соответствуют действительности и поэтому все эти сведения **недостоверны**.

В связи с указанным выше можно сделать следующее заключение.

Сведения в работе [1] о наличии в ней адекватной физико-математической модели и основах теории АДУ, об уменьшении плотности дислокаций и приближении значений параметров кристаллической решетки к величинам параметров идеальной, сведения о резонансе атомов кристаллической решетки и их смещения от воздействия звука при АДУ, а также термин «аэродинамическое звуковое упрочнение» **недостоверны**.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Жигалов. – Мн., 2021. – 378 с.
2. Свистки // Энциклопедия физики и техники. // Электронный ресурс. – URL: [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/3578.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/3578.html) (дата обращения: 18.09.2025).
3. Улитенок, А. О. Влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на твердость чугуна / А. О. Улитенок // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 146–147.
4. Иванова, Л. В. Об амплитуде колебаний атомов компонентов твердых сплавов при аэродинамическом воздействии / Л. В. Иванова // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 131–132.
5. Марукович, Е. И. О влиянии аэродинамического звукового упрочнения на свойства сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Горная механика. – 2023. – № 3. – С. 67–70.
6. Марукович, Е. И. О неэффективности аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) твердых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Актуальные проблемы прочности: Материалы LXVIII междунар. науч. конф. г. Витебск (27–31 мая 2024 г.) / Под ред. В. В. Рубаника. – Мн.: УП ИВЦ Минфина, 2024. – С. 83–85.
7. Марукович, Е. И. Глава 8 Некоторые аспекты аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Перспективные материалы и технологии / Под. общ. ред. В. В. Рубаника. – Мн., 2025. – С. 102–108.
8. Карабанов, Д. Р. Философский аспект основы теории аэродинамического звукового упрочнения / Д. Р. Карабанов // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 148–148.
9. Жариков, А. Н. Расчет интенсивности звуковой энергии для обработки твердого сплава методом аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жариков, А. Н. Жигалов // Технологическое обеспечение машиностроительного производства: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2024. – 211 с.
10. Горавский, И. А. Энергетические процессы при аэродинамическом звуковым упрочнении концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов // Материалы и технологии. – 2024. – № 2 (14). – С. 10–18.
11. Улитенок, А. О. О теоретических основах аэродинамического звукового воздействия // Перспективные материалы и технологии: материалы междунар. симпозиума, Витебск, 25–29 августа 2025 г. / Под. ред. В. В. Рубаника – Минск: ИВЦ Минфина, 2025. – С. 129–131.
12. Лушпай, С. А. Об энергии аэродинамического звукового воздействия / С. А. Лушпай // Литье и металлургия. 2023. – № 3. – С. 116–117.
13. Улитенок, А. О. Явления в кристаллической решетке при аэродинамическом звуковым упрочнении / А. О. Улитенок // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 141–142.
14. Улитенок, А. О. Об отсутствии изменений плотности дислокаций и параметров кристаллических решеток твердых сплавов при аэродинамическом звуковым воздействием / А. О. Улитенок // Актуальные проблемы прочности: Материалы LXVIII междунар. науч. конф. г. Витебск (27–31 мая 2024 г.) / Под ред. В. В. Рубаника. – Мн., 2024. – С. 73–75.
15. Улитенок, А. О. Об отсутствии влияния аэродинамического звукового воздействия на прочностные свойства серого чугуна / А. О. Улитенок // Актуальные проблемы прочности: Материалы LXVIII междунар. науч. конф. г. Витебск (27–31 мая 2024 г.) / Под ред. В. В. Рубаника. – Мн., 2024. – С. 76–77.

16. **Марукович, Е. И.** Влияние аэродинамического звукового воздействия на свойства твердых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы IV Междунар. науч. конф. г. Витебск (март 2023 г.) / Под ред. В. В. Рубаника. – Мн., 2023. – С. 118–119.
17. **Стеценко, В. Ю.** О методе аэродинамического звукового упрочнения металлокерамических твердых сплавов / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 137–138.
18. **Улитенюк, А. О.** Расчет энергии аэродинамического звукового воздействия на атомы кристаллической решетки / А. О. Улитенюк // Литье и металлургия. – 2024. – № 2. – С. 170–172.
19. **Улитенюк, А. О.** Об энергии аэродинамического звукового и ультразвукового воздействия на металлы и сплавы / А. О. Улитенюк // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы (ТА2025): V Международная науч. конф., Тольятти, 19–21 мая 2025 г. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2025. – С. 85–86.
20. **Максименко, Г. З.** О термической обработке при аэродинамическом звуковом воздействии / Г. З. Максименко, А. О. Улитенюк // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума, Витебск, 25–29 августа 2025 г. / Под ред. В. В. Рубаника – Мн., 2025. – С. 218–219.
21. **Стеценко, В. Ю.** О перспективности метода аэродинамического звукового упрочнения сплавов / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 133–134.
22. **Улитенюк, А. О.** О влиянии аэродинамического звукового воздействия на плотность дислокаций твердых сплавов / А. О. Улитенюк // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 135–136.
23. **Лушпай, С. А.** О проникновении энергии аэродинамического звукового воздействия в твердый сплав / С. А. Лушпай // Литье и металлургия. – 2024. – № 3. – С. 100–101.
24. **Марукович, Е. И.** Влияние звука на упрочнение металлов и сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Перспективные материалы и технологии: материалы междунар. симпозиума (Минск, 21–23 августа 2023 г.) / Под ред. В. В. Рубаника. – Мн., 2023. – С. 251–252.
25. **Стеценко, В. Ю.** Расчет среднего звукового давления при обработке сплавов методом аэродинамического звукового упрочнения / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 136.
26. **Стеценко, В. Ю.** Может ли звук упрочнять металлы и сплавы? / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 3. – С. 111.

## REFERENCES

1. **Zhigalov A. N.** Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy ajerodinamicheskogo zvukovogo uprochnenija tverdosplavnogo instrumenta dlja processov preryvistogo rezanija. Diss. d-ra tehn. nauk [Theoretical and Technological Foundations of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools for Intermittent Cutting Processes. Diss.dr. Scien.]. Minsk, 2021, 378 p.
2. [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/3578.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/3578.html)
3. **Ulitjonok A. O.** Vlijanie metoda ajerodinamicheskogo zvukovogo uprochnenija na tverdosť chuguna [The influence of the aerodynamic sound hardening method on the hardness of cast iron]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 146–147.
4. **Ivanova L. V.** Ob amplitude kolebanij atomov komponentov tverdyh spлавov pri ajerodinamicheskom vozdejstvii [On the amplitude of oscillations of atoms of components of hard alloys under aerodynamic influence]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 131–132.
5. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Ju.** O vlijanii ajerodinamicheskogo zvukovogo uprochnenija na svojstva сплавov [On the influence of aerodynamic sound hardening on the properties of alloys]. *Gornaja mehanika = Mining Mechanics*, 2023, no. 3, pp. 67–70.
6. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Ju.** O neeffektivnosti ajerodinamicheskogo zvukovogo uprochnenija (ADU) tverdyh сплавov [On the inefficiency of aerodynamic sound hardening (ASH) of hard alloys]. *Aktual'nye problemy prochnosti: Materialy LXVIII mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, g. Vitebsk (27–31 maja 2024 g. = Current problems of strength: Proceedings of the LXVIII international scientific conference, Vitebsk, May 27–31, 2024. Minsk, UP IVC Minfina Publ., 2024, pp. 83–85.*
7. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Ju.** Glava 8 Nekotorye aspekty ajerodinamicheskogo zvukovogo uprochnenija (ADU) сплавov [Chapter 8: Some Aspects of Aerodynamic Sound Hardening (ASH) of Alloys]. *Perspektivnye materialy i tehnologii = Advanced Materials and Technologies*, Minsk, IVC Minfina Publ., 2025, pp. 102–108.
8. **Karabanov D. R.** Filosofskij aspekt osnovy teorii ajerodinamicheskogo zvukovogo uprochnenija [The philosophical aspect of the basis of the theory of aerodynamic sound hardening]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 148–148.
9. **Zharikov A. N., Zhigalov A. N.** Raschet intensivnosti zvukovoj jenerгии dlja obrabotki tverdogo сплава metodom ajerodinamicheskogo zvukovogo uprochnenija [Calculating Sound Energy Intensity for Hard Alloy Machining Using Aerodynamic Sound Hardening]. *Tehnologicheskoe obespechenie mashinostroitel'nogo proizvodstva = Technological Support for Mechanical Engineering Production*, Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2024, 211 p.
10. **Goravskij I. A., Zhigalov A. N.** Jenergeticheskie processy pri ajerodinamicheskom zvukovom uprochnenii koncevogo frezernogo instrumenta iz bystrorezhushhej stali R6M5 [Energy processes during aerodynamic sonic hardening of end milling tools made of P6M5 high-speed steel]. *Materialy i tehnologii = Materials and Technologies*, 2024., no. 2 (14), pp. 10–18.
11. **Ulitjonok A. O.** O teoreticheskikh osnovah ajerodinamicheskogo zvukovogo vozdejstvija [On the Theoretical Foundations of Aerodynamic Sound Effects]. *Perspektivnye materialy i tehnologii: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma, Vitebsk, 25–29 avgusta 2025 g. [Advanced Materials and Technologies: Proceedings of the International Symposium, Vitebsk, August 25–29, 2025]. Minsk, IVC Minfina Publ., 2025, pp. 129–131.*
12. **Lushpaj S. A.** Ob jenerгии ajerodinamicheskogo zvukovogo vozdejstvija [On the Energy of Aerodynamic Sound Effects]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, no. 3, pp. 116–117.
13. **Ulitjonok A. O.** Javlenija v kristallicheskoj reshette pri ajerodinamicheskom zvukovom uprochnenii [Crystal Lattice Phenomena during Aerodynamic Sound Hardening]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 141–142.
14. **Ulitjonok A. O.** Ob otsutstvii izmenenij plotnosti dislokacij i parametrov kristallicheskih reshetok tverdyh сплавov pri ajerodinamicheskom zvukovom vozdejstvii [On the absence of changes in the dislocation density and crystal lattice parameters of hard alloys