

УДК 621.9

А. Н. Жигалов¹, доктор технических наук, доцент,
И. А. Горавский²

¹Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов
Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев,
Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

^{1,2}Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

Обработка методом аэродинамического звукового упрочнения заключается в низкотемпературной аэродинамической вибрационной обработке, являющейся способом физико-технического воздействия на материал, основанной на сочетании предварительного нагрева до температур, не вызывающих фазовых превращений, и низкочастотного вибрационного воздействия, обеспечивающего релаксацию остаточных напряжений и перераспределение дефектов кристаллической структуры.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения; быстрорежущие стали; виброскорости; виброперемещения; циклические напряжения; металлорежущий инструмент.

Рис. 5. Табл. 4. Библиогр.: 8 назв.

A. N. Jigalov¹, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,
I. A. Goravskii²

¹State Scientific Institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus”,
11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus,
+ 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

^{1,2}Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus

RESEARCH OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS IN AERODYNAMIC SOUND TREATMENT OF R6M5 HIGH-SPEED STEEL

Aerodynamic sound hardening treatment involves low-temperature aerodynamic vibration treatment — a method of physical and technical influence on a material based on a combination of preliminary heating to temperatures that do not cause phase transformations and low-frequency vibration exposure, which ensures the residual stresses relaxation and the defects redistribution in the crystalline structure.

Key words: aerodynamic sound hardening method; high-speed steels; vibration speeds; vibration displacements; cyclic stress; metal-cutting tool.

Fig. 5. Table. 4. Ref.: 8 titles.

Введение. В твердых телах, в том числе сталях, существует запасенная энергия — энергия, за счет которой термодинамическая система (без подвода тепла извне) способна совершать работу. Энергия в твердом теле может быть запасена в виде различных дефектов в кристаллической решетке, например, дефектов Френкеля [1]. Запасенная энергия является важным фактором, определяющим предел прочности материала как состояние с максимальной запасенной энергией.

Энергия, запасенная в стали, проявляется через внутренние напряжения, дефекты кристаллической решетки (дислокации, вакансии) и накопленные искажения, которые повышают ее внутреннюю энергию и потенциально могут быть выделены при нагреве или обработке, вызывая изменения в механических свойствах (твердость, пластичность), а также как энергия, «запертая» в напряжениях после пластической деформации (например, при

прокатке, изгибе и др.). Разные структуры стали (перлит, мартенсит), легирующие элементы и термообработка определяют, сколько энергии может запасти и отдать сталь, что важно для упругости и ударостойкости [1].

Повысить ресурс концевой фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей при процессах прерывистого резания возможно за счет уменьшения уровня запасенной энергии, что обеспечит снятие внутренних напряжений и уменьшение плотности дислокаций структуры, а значит, произойдет увеличение ударной вязкости инструментального материала.

Материалы и методы исследования. Наиболее эффективно уменьшить уровень запасенной энергии при сохранении исходных параметров по твердости возможно за счет воздействия энергий от механических колебаний, образованных звуковыми волнами, при методе аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ) [2].

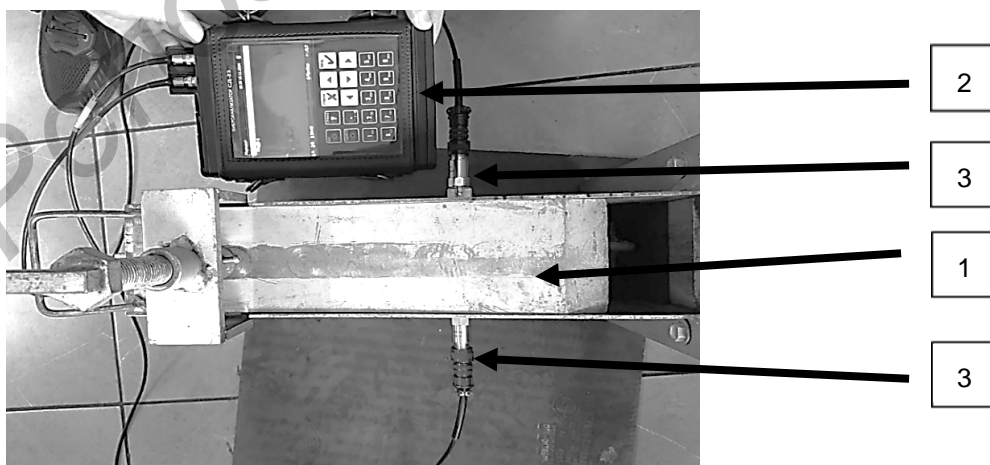
Метод АДУ не является общепринятым физико-техническим методом упрочнения в международной практике в отличие, например, от ультразвуковой обработки (20...40 кГц), виброударного упрочнения, термомеханической обработки. Звуковое воздействие при методе АДУ в диапазоне 150...70 Гц не имеет пока теоретической, строго доказанной физической интерпретации как самостоятельного механизма пластической релаксации кристаллической решетки и носит полуэмпирический характер.

При АДУ воздействие на обрабатываемый материал носит квазистатический вибрационный характер, а не волновой в строгом физическом смысле. В установке реализуется механический резонанс стенок камеры и системы «камера—воздух».

Резонансные частоты 150...170 Гц внешнего воздействия относятся к низкочастотным механическим колебаниям. Генерация резонансных волн стенок камеры подчиняется законам линейной акустики и теории звуковых волн.

Для оценки амплитудно-частотных характеристик проводились измерения среднеквадратичного значения виброскорости и частоты в диапазоне 10...6 400 Гц. В качестве измерительного прибора использовался виброанализатор СД-23 (ООО «Ассоциация ВАСТ», Россия), принцип работы которого основан на измерении электрического сигнала, поступающего от преобразователей вибраций, установленных на колеблющихся стенках установки АДУ. Преобразование входных аналоговых сигналов первичных преобразователей осуществляется с применением устройства, преобразующего аналоговый сигнал в цифровой, для каждого канала. С помощью преобразователей вибраций сигнал передается на виброанализатор СД-23.

На рисунке 1 представлены приборы и устройства, участвующие при измерении амплитудно-частотных характеристик установки АДУ.



1 — установка АДУ; 2 — виброанализатор СД-23; 3 — преобразователи вибраций

Рисунок 1. — Установка АДУ, виброанализатор СД-23 и преобразователи вибраций при измерении амплитудно-частотных характеристик

При колебании стенок резонансной камеры установки АДУ образуются акустические волны [2]. Продольные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы при деформациях сжатия и растяжения, т. е. в твердых, жидких и газообразных средах. Продольные волны перемещаются в средах в виде чередующихся сгущений и разрежений среды. Поперечные волны могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы при деформации сдвига, т. е. только в твердых телах. В газах возникают только продольные волны, а в твердых телах — как продольные, так и поперечные волны [3].

Результаты исследования и их обсуждение. Резонансные амплитуды виброперемещений $A_{рез}$ (мм) определялись в зависимости от резонансных амплитуд виброскоростей $V_{рез}$ (мм / с) и резонансных частот $\omega_{рез}$ (Гц), связанных с периодом — интервалом времени, в течение которого происходит одно полное колебание, по формуле [4]

$$A_{рез} = \frac{V_{рез}}{2\pi\omega_{рез}}. \quad (1)$$

Резонансные амплитуды $V_{рез}$ и частоты $\omega_{рез}$ фиксировались экспериментально виброанализатором СД-23 с помощью преобразователя вибраций частот [5].

При расчетах $A_{рез}$ принимались значения плотности $\rho = 7\,850 \text{ кг / м}^3$ для стали 10, из которой изготавливались вибрирующие стенки резонансной камеры установки АДУ.

В таблице 1 приведены значения резонансных частот $\omega_{рез}$, виброскоростей $V_{рез}$, виброперемещений $A_{рез}$ в центре колеблющихся боковых стенок (левой и правой) резонансной камеры установки АДУ при различных размерах выходного канала.

Как видно из таблицы 1, существует некоторое расхождение значений виброскоростей и амплитуд виброперемещений, генерируемых левой и правой сторонами резонатора установки АДУ, которое составляет не более 4,1 %. Расхождения образуются из-за погрешности измерения (размещения преобразователей вибраций), настройки самой установки АДУ, неровности пола и других факторов. Однако такая погрешность, являющаяся весьма приемлемой, нивелируется за счет смещения центра пересечения встречных волн, поступающих от левой и правой колеблющихся стенок резонатора.

На рисунке 2 приведены зависимости резонансных амплитуд виброперемещений $A_{рез}$ от размера входного канала установки АДУ.

На графиках (см. рисунок 2) видны два максимума, на которых образуются наибольшие резонансные амплитуды виброскоростей: при размерах входных каналов 85 и 130 мм. Подтверждено, что на рациональных режимах обработки при АДУ инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 (режим 1 — на частоте 154 Гц и при размере входного канала 85 мм; режим 2 — на частоте 168 Гц и при размере входного канала 130 мм) образуются также наибольшие резонансные виброперемещения [5].

Т а б л и ц а 1. — Энергетические характеристики колеблющихся стенок установки АДУ

Размер выходного канала, мм	$\omega_{рез}$, Гц	$V_{рез}$, мм / с		$A_{рез}$, мм	
		Левая стенка	Правая стенка	Левая стенка	Правая стенка
70	154	121	119	0,125	0,123
85	154	185	191	0,191	0,197
100	150	167	161	0,177	0,171
115	151	179	186	0,173	0,177
130	168	182	187	0,189	0,196
140	152	143	147	0,150	0,154
145	152	146	140	0,153	0,147
170	150	83	84	0,088	0,089

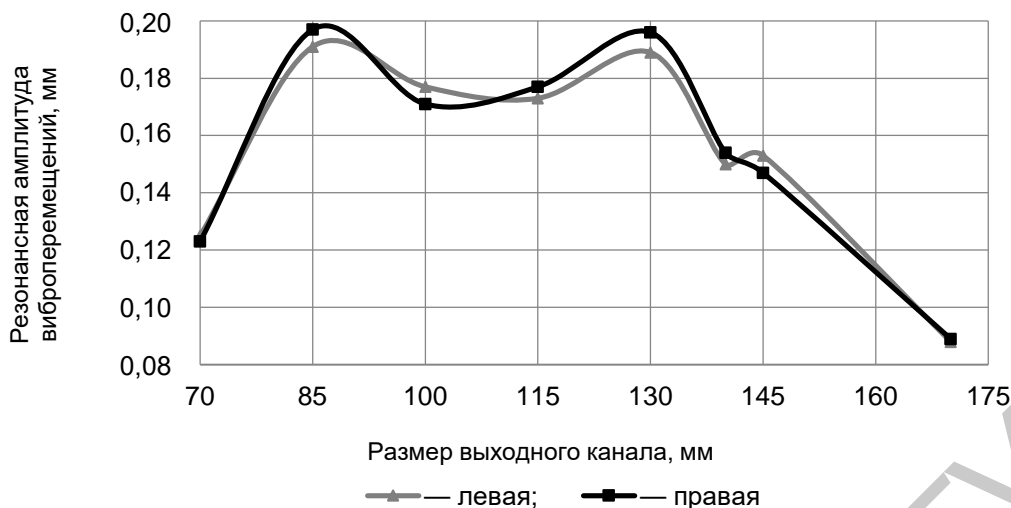


Рисунок 2. — Зависимости резонансных амплитуд виброскоростей от размера входного канала установки АДУ

Передача акустической волны от стенки камеры к изделию происходит через воздушную среду. Коэффициент прохождения волны из воздуха в сталь зависит от акустических импедансов Z — характеристик сред, определяющих сопротивление распространению звука, которые определялись по формуле

$$Z = \rho c_c,$$

где c_c — скорость звука.

При $\rho \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$ и $c_c \approx 343 \text{ м/с}$ акустический импеданс воздуха $Z_1 \approx 411 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. При $\rho \approx 8 \text{ 300 кг/м}^3$ для стали Р6М5 и $c_c \approx 5 \text{ 900 м/с}$ (для продольной волны) акустический импеданс быстрорежущей стали $Z_2 \approx 48 \text{ 970 000 кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

Коэффициент отражения волны R определяется как [6]

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right). \quad (2)$$

После подстановки в (2) значений акустических импедансов воздуха и стали получим следующее:

$$R = \left(\frac{47 \text{ 790 000} - 411}{47 \text{ 790 000} + 411} \right) = 0,99998277.$$

Коэффициент прохождения волны

$$T = 1 - R \approx 1 - 0,99998277 \approx 0,00001723. \quad (3)$$

Коэффициент прохождения волны T очень близок к нулю, а это означает, что часть энергии не проходит через среду, а отражается от границы «воздух—сталь».

Из формулы (3) для коэффициента отражения видно, что чем больше отличаются акустические импедансы сред, тем большая часть энергии звуковой волны отразится от границы раздела двух сред. Этим и объясняется как возможность, так и эффективность функционирования установки АДУ. В установке АДУ акустические давления отраженных волн от границы раздела сред (воздух—сталь) суммируются с акустическим давлением от источника [7].

Решение задачи воздействия на изделие усиленного акустического давления от генерируемой волны колеблющихся стенок резонатора установки АДУ осуществлялось через работу деформации, которую обеспечивает акустическое давление на поверхность изделия из быстрорежущей стали Р6М5.

Оценка напряжений, возникающих в обрабатываемом изделии от квазистатического вибрационного характера, осуществлялась с позиций сопротивления материала воздействию виброперемещениям. Согласно закону Гука [8], напряжения σ (МПа), возникающие в изделии от воздействия деформаций $\varepsilon = A_{рез}$, зависят от модуля Юнга E (МПа), обрабатываемого изделия и определяются как

$$\sigma = A_{рез}E. \quad (4)$$

Деформации, воздействующие на обрабатываемое изделие в резонансной камере установки АДУ, определялись следующим образом. Преобразователь вибраций, соединенный с виброанализатором СД-23, устанавливали непосредственно на специально изготовленном образце из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 30 мм и толщиной 8 мм, который закреплялся в центре поддерживающего устройства. Само поддерживающее устройство размещалось внутри резонансной камеры установки АДУ (рисунок 3).

На изделии от воздействия акустических волн, возникающих от резонансных колебаний стенок установки АДУ, фиксировались резонансные виброскорости и частоты. Значения резонансных виброскоростей, частот, а также рассчитанных резонансных амплитуд виброперемещений по (1) и напряжений по (4), возникающих в изделии, размещенном упруго в поддерживающем устройстве, сведены в таблицу 2.



Рисунок 3. — Виброанализатор СД-23 и преобразователь вибраций при измерении амплитудно-частотных характеристик внутри установки АДУ

Т а б л и ц а 2. — Значения частот, виброскоростей, амплитуд виброперемещений и напряжений, возникающих в изделии, размещенном упруго в поддерживающем устройстве

Размер выходного канала, мм	Виброскорость $V_{рез}$, мм / с	Частота $\omega_{рез}$, Гц	Амплитуда виброперемещений $A_{рез}$, мкм	Напряжения в изделии, МПа
70	15,7	150	17	5 100
85	37,0	148	40	12 100
100	35,5	147	38	11 700
115	35,7	147	39	11 800

Окончание табл. 2.

Размер выходного канала, мм	Виброскорость $V_{рез}$, мм / с	Частота $\omega_{рез}$, Гц	Амплитуда виброперемещений $A_{рез}$, мкм	Напряжения в изделии, МПа
130	37,5	146	41	12 500
140	29,8	145	33	10 000
145	27,3	144	30	9 200
160	8,48	134	10	3 100

На рисунке 4 приведены зависимости напряжений, возникающих в изделии, размещенном упруго в поддерживающем устройстве, при различных размерах выходного канала резонансной камеры установки АДУ.

Анализ данных таблицы 2 и рисунка 4 показывает, что при АДУ на изделие, размещенное упруго в поддерживающем устройстве, при размере выходного канала резонансной камеры 85 и 130 мм действуют напряжения порядка 12 100...12 500 МПа. Такие напряжения, превышающие предел прочности при изгибе 2 250...3 800 МПа и предел прочности при сжатии 3 450...4 660 МПа быстрорежущих сталей, способны такую сталь разрушить, но этого не происходит из-за того, что само изделие упруго перемещается относительно поддерживающего устройства.

Проведено дополнительное исследование по определению уровня напряжений, возникающих от АДУ непосредственно в изделии, устранив влияние упругих деформаций поддерживающего устройства. Для этого в поддерживающем устройстве закрепляли массивную заготовку из Р6М5 толщиной 25 мм. Само поддерживающее устройство утяжеляли, приваривая к нижнему основанию поддерживающего устройства металл весом около 3,0 кг, и устанавливали в камере без возможности перемещения.

Результаты замеров резонансных виброскоростей и частот, а также рассчитанных по (1) и (4) резонансных амплитуд виброперемещений и деформаций, возникающих в изделии, размещенном жестко в поддерживающем устройстве, сведены в таблицу 3.

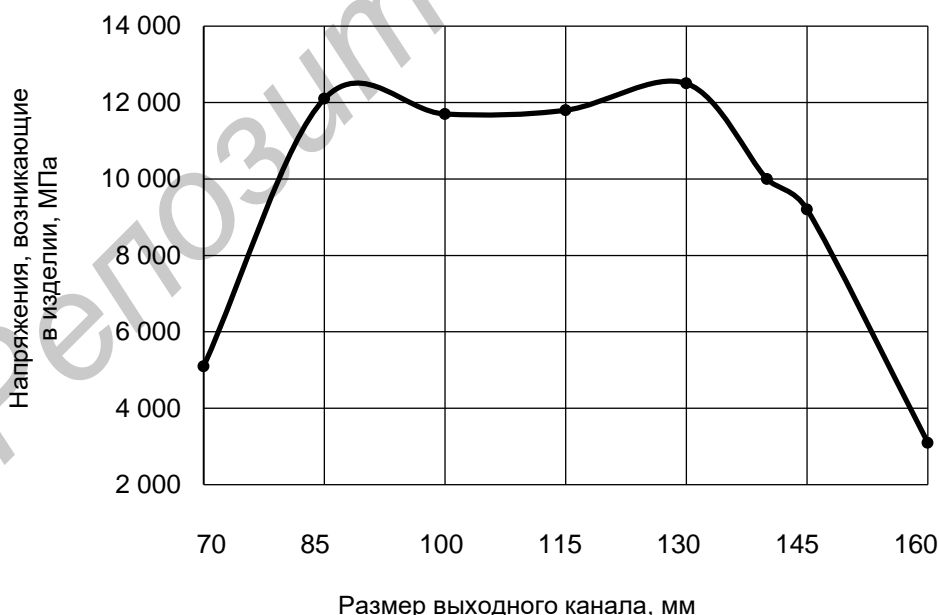


Рисунок 4. — Зависимость напряжений, действующих на изделие, размещенное упруго в поддерживающем устройстве, при различных размерах выходного канала резонансной камеры установки АДУ

Т а б л и ц а 3. — Значения частот, виброскоростей, амплитуд виброперемещений и напряжений, возникающих в изделии, размещенном жестко в поддерживающем устройстве

Размер выходного канала, мм	Резонансная виброскорость $V_{рез}$, мм / с	Частота $\omega_{рез}$, Гц	Амплитуда виброперемещений $A_{рез}$, мкм	Напряжения в изделии, МПа
70	1,40	155	1,4	309
85	2,06	147	2,2	480
100	1,87	148	2,0	433
115	1,74	151	1,8	395
130	2,00	150	2,1	456
140	1,53	150	1,6	349
145	1,43	143	1,6	342
160	0,92	144	1,0	219

На рисунке 5 приведены зависимости напряжений, возникающих в изделии, размещенном жестко в поддерживающем устройстве, при различных размерах окна резонансной камеры установки АДУ.

Анализ данных таблицы 3 и рисунка 5 показывает, что при АДУ на изделие, размещенное жестко в поддерживающем устройстве, при размере выходного канала резонансной камеры 85 и 130 мм действуют циклические напряжения порядка 456...480 МПа. Такие циклические напряжения, являющиеся значительно ниже предела прочности при изгибе 2 250...3 800 МПа и предела прочности при сжатии 3 450...4 660 МПа быстрорежущих сталей, не способны разрушить такую сталь, но в то же время воздействие такого уровня циклических напряжений при АДУ на изделие из быстрорежущей стали близко к возможности уменьшения напряжений, существующих в концевом фрезерном инструменте уровня 400...600 МПа, изменения напряжений растяжения на напряжения сжатия.

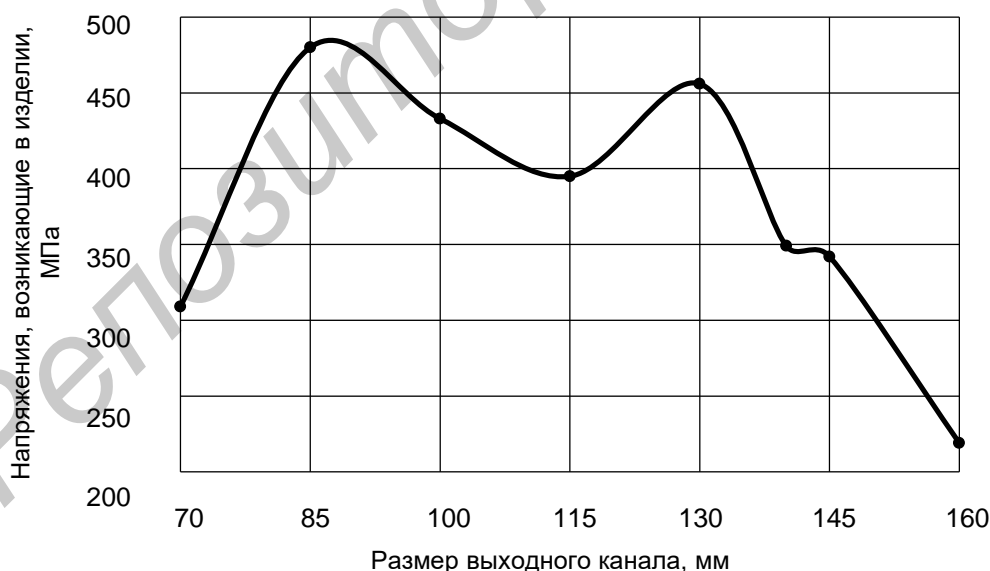


Рисунок 5. — Зависимость напряжений, действующих на изделие, размещенное жестко в поддерживающем устройстве, при различных размерах выходного канала резонансной камеры установки АДУ

Заключение. При аэродинамической звуковой обработке концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 в диапазоне звукового спектра частот 150...170 Гц возникают волновые вибрационные воздействия, генерирующие на боковых стенках резо-

нансной камеры установки АДУ виброскорости и виброперемещения, формирующие через воздушную среду в инструменте циклические напряжения 456...480 МПа, обеспечивающие повышение активности движения и снижение плотности дислокаций, их аннигиляцию, уменьшение напряжений.

Установлено, что при АДУ существуют два рациональных режима обработки, на которых в обрабатываемом изделии из быстрорежущей стали Р6М5 образуются наибольшие циклические напряжения: режим 1 на частоте 154 Гц при размере выходного канала 85 мм образует циклические напряжения 480 МПа; режим 2 на частоте 168 Гц при размере выходного канала 130 мм образует циклические напряжения 456 МПа.

Список цитируемых источников

1. *Мостовщиков, А. В.* Виды запасенной энергии в твердых телах : монография / А. В. Мостовщиков ; под ред. А. П. Ильина ; Том. политехн. ун-т. — Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2017. — 119 с.
2. *Жигалов, А. Н.* Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.07 / А. Н. Жигалов. — Мн., 2021. — 382 л.
3. *Борисовский, В. В.* Колебания и волны (теория и практика) : учеб. пособие для студентов всех направлений / В. В. Борисовский ; Рубц. индустр. ин-т. — Рубцовск, 2014. — 48 с.
4. *Инженерная акустика и практика борьбы с шумом : учебник.* — М. : Университет. кн. : Логос, 2008. — 424 с.
5. *Горавский, И. А.* Энергетические процессы при аэродинамическом звуковом упрочнении концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов // *Материалы и технологии.* — 2024. — № 2 (14). — С. 10—18.
6. *Соловьянова, И. П.* Теория волновых процессов: акустические волны : учеб. пособие / И. П. Соловьянова, С. Н. Шабунин. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. — 142 с.
7. *Теоретическое обоснование формирования слабых ударных волн в процессе аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жигалов, Ю. Д. Черняков, М. В. Башаримов [и др.] // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки».* — 2025. — Вып. № 1 (17). — С. 22—30.
8. *Безъязычный, В. Ф.* Обеспечение показателей качества поверхностного слоя деталей ГТД и их влияние на эксплуатационные свойства : учеб. пособие / В. Ф. Безъязычный. — Рыбинск : Сатурн, 2004. — 314 с.

Поступила в редакцию 26.03.2026.