

УДК 621.9

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

*ШЕЛЕГ Валерий Константинович¹, Чл.-кор. НАН Беларуси, доктор техн. наук.,
профессор, e-mail: Sheleh_v@tut.by*

*ЖИГАЛОВ Анатолий Николаевич², канд. техн. наук, доцент,
e-mail: jigalov6@mail.ru*

*БОГДАН Дмитрий Дмитриевич², аспирант,
e-mail: Dmitri_bogdan@tut.by*

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

²Барановичский государственный университет, 225404, Республика Беларусь,
г. Барановичи, ул. Войкова, 21

Аннотация

Показаны проблемы, возникающие при обработке твердосплавным инструментом прерывистых поверхностей, которые можно решить за счет использования метода аэродинамического звукового упрочнения (АДУ). Приведено описание физики процесса АДУ и его реализации. Показано, что применение метода АДУ повышает прочностные свойства твердых сплавов: происходит увеличение ударной вязкости по сравнению с неупрочненными образцами на: 23 % – для сплава Т15К6; 21 % – для Т5К10; 19 % – для ВК8; предел прочности при изгибе у твердосплавных пластин сплавов Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 увеличивается на 19...23 %. При эксплуатации в условиях прерывистого резания, с ударными и циклическими нагрузками обеспечивается повышение стойкости в 1,35-3,8 раза, такого твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, как фрезерный, токарный для контурного точения, отрезания, обработки канавок, резьбонарезной, сверлильный, а также инструмента для горнодобывающей и строительно-дорожной промышленности.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения, твердые сплавы, прерывистое резание.

Введение

В настоящее время твердосплавный инструмент широко применяется практически во всех отраслях промышленности благодаря своим высоким режущим свойствам, а также высокой твердости, прочности и износостойкости. Твердый сплав, изготавливаемый методом спекания карбидов вольфрама и других металлов в кобальтовой и/или никелевой связке, имеет большие структурные погрешности. Плотность дислокаций достигает величин $10^6 \dots 10^7 \text{ м}^{-2}$ [1]. С одной стороны, дислокационные образования способствуют повышению твердости, а с другой снижают прочностные характеристики твердого сплава. Наиболее широко используется твердосплавный инструмент в металлообработке, доля которого в мире составляет более 60 %. Мировой рынок металлообрабатывающего твердосплавного инструмента в 2020 году составляет более 22 млрд. долл. США [2]. Такой твердосплавный инструмент, как фрезерный, токарный, осуществляющий контурное точение, обработку прерывистых поверхностей, подрезание, отрезание, обработку канавок,

резьбонарезной инструмент, сверлильный, а также весь многозубый инструмент, работает в условиях прерывистого резания.

Также большое количество твердосплавного инструмента, в виде резцов для проходческих комбайнов, буровых коронок, дорожных резцов, бор-фрез и ряд другого аналогичного инструмента, используется в таких отраслях, как горнодобывающая и строительно-дорожная. Только объём российского рынка бурового ударно-вращательного инструмента, осуществляющего бурение твёрдых пород и применяемых в горнодобывающей отрасли, в 2020 году составит 6,7-8,5 млрд. руб. [3]. Практический весь инструмент, предназначенный для горнодобывающей и строительно-дорожной промышленности, также работает в условиях прерывистого резания.

Как видно, рынок твердосплавного инструмента, работающего в наиболее тяжелых условиях, связанных с прерывистым резанием, огромен. Стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании является низкой, приблизительно в два и более раза ниже, чем при непрерывном резании. Повышенный износ при прерывистом резании объясняется сложностью и не стабильностью такого процесса. Возникающие микросколы режущей кромки из-за явления удара при прерывистом резании происходят при частых циклических изменениях силового и температурного полей на режущем клине инструмента при рабочих и холостых ходах, неблагоприятном расположении режущего клина в процессе стружкообразования и других явлений [1].

Основная часть

Специфика обработки при прерывистом резании требует наличия более совершенного твердосплавного инструмента, обладающего одновременно высокими показателями как по твердости, так и по ударной вязкости (трещиностойкости). Достижение таких показателей за счет структурной модификации при изготовлении твердых сплавов является дорогостоящим направлением. Известные методы высоко- и низкоэнергетического упрочнения твердосплавного инструмента не в состоянии обеспечить комплексное улучшение характеристик твердых сплавов: при низкотемпературном – из-за отсутствия необходимого уровня энергетического воздействия, способного обеспечить упрочнение по всему объему; при высокоэнергетическом – повышение вязкопрочностных характеристик сопровождается снижением твердостных параметров сплавов из-за температурного отпуска.

Созданный и запатентованный новый метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [4, 5], способен преодолеть описанные выше проблемы. Метод АДУ, основанный на высокоэнергетическом низкотемпературном воздействии резонансных волн звуковой частоты, способных проникать на зерновой и кристаллический уровень твердых сплавов, обеспечивает достижение повышенных свойств твердых сплавов за счет снижения их дефектности и улучшения однородности структуры. Физика процесса АДУ заключается в том, что упрочняемое изделие предварительно нагревается до допустимой температуры $T_{дон}$ (°C), при которой твердый сплав не потеряет приобретенную при изготовлении пластичность и твердость, но при этом внутренняя энергия E_T свободных колебаний атомов структурных элементов сплава массой m увеличивается на величину $E_T=24,94338 \cdot m \cdot (T_{дон}+273,15)$. Уровень таких энергий для атомов W, Ta, Ti, Co при $T_{дон} = 320$ °C достигает $E_T=(1,18...4,51) \cdot 10^{-21}$ Дж, что практически в два раза больше, чем при $T_{дон} = 20$ °C, когда $E_T=(0,58...2,23) \cdot 10^{-21}$ Дж [6, 3]. После чего на изделие воздействуют звуковыми волнами при частотах 140...160 Гц, приведенных в резонансное состояние, при котором происходит образование увеличенной в несколько сот раз резонансной амплитуды относительно свободных колебаний (рис. 1).

Метод АДУ реализуется следующим образом. Упрочняемые твердые сплавы выдерживают в термической печи при допустимой температуре в течение времени выдержки равном не менее 1,6 минуты на один миллиметр наибольшего размера

упрочняемого изделия. После чего разогретые изделия перемещаются в камеру для АДУ, представляющую собой воздушный резонатор, в которую подается воздух под давлением в диапазоне от 1,5 бар до 2,0 бар и при часовом потреблении воздуха в объеме 2,5...5,0 м³ в зависимости от режима обработки. При таких режимах на частотах до 300 Гц в камере возникают резонансные амплитудные колебания противоположных стенок. Время выдержки в камере составляет 3...4 минуты в зависимости от вида твердого сплава. После упрочнения производят несколько циклов старения при температуре 150...170 °С.

Экспериментально подтверждено, что после АДУ у твердых сплавов Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 происходит релаксация дефектности и улучшение структуры твердых сплавов: повышается однородность структуры на 16 %, увеличивается пластичность Со и TiС, снижается плотность дислокаций на 12...16 %, искажение линейных размеров кристаллических решеток уменьшаются на 0,03...0,09 %. Применение метода АДУ повышает прочностные свойства твердых сплавов: происходит увеличение ударной вязкости по сравнению с неупрочненными образцами на: 23 % – для сплава Т15К6; 21 % – для Т5К10; 19 % – для ВК8; предел прочности при изгибе у твердосплавных пластин сплавов Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 увеличивается на 19...23 %, при этом не происходит снижения твердости и плотности структуры твердых сплавов [7, 8, 9].

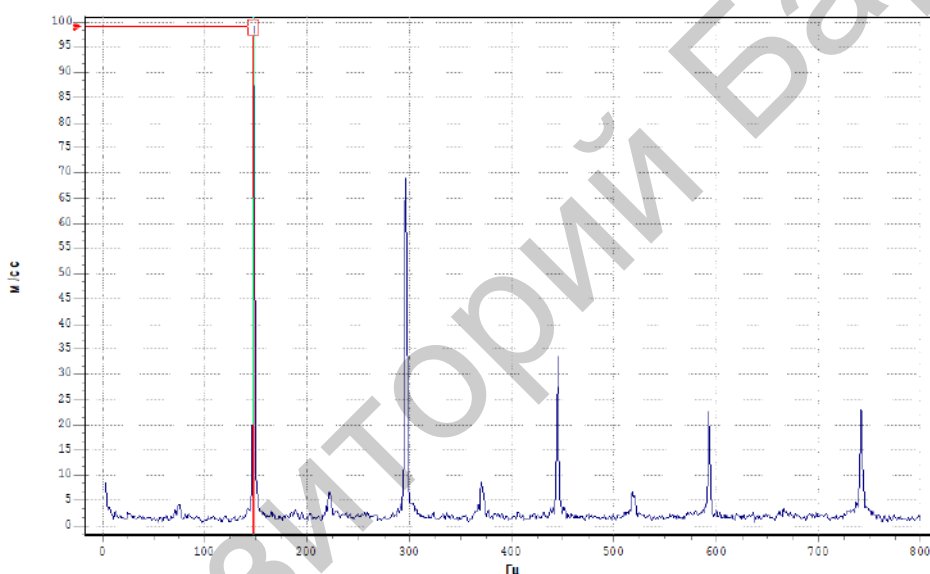


Рисунок 1 – Спектр амплитудных виброускорений на корпусе установки для АДУ

Промышленная апробация метода АДУ

С помощью разработанной методики имитационного моделирования явлений в зоне резания, позволяющей производить анализ и оценку явлений внутреннего трения, адгезии, интенсивности сдвига, формирования износа, деформационных, термодинамических, микрогеометрических параметров, происходящих в зоне резания твердосплавным инструментом, упрочненным АДУ, а также математической модели и методики параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, осуществлено прогнозирование оптимальных технологических параметров, обеспечивающих достижение максимальной ресурсной стойкости инструмента, упрочненного методом АДУ [1]. Данные разработки позволили произвести ускоренные масштабные производственные испытания упрочненного АДУ разнообразного по техническому назначению и применяемым режимам резания твердосплавного инструмента, используемого при обработке широкой гаммы деталей из разных материалов. Опытно-промышленные апробации метода АДУ произведены в производственных условиях ряда машиностроительных предприятий (ОАО «Могилевский

лифтостроительный завод», ОАО «Могилевский завод Строммашина», ЗАО «Промлизинг», ОАО «Могилевский завод Электродвигатель», ОАО «СтанкоГомель», ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит»), ЗАО «НИР» г. Рыбинск, ОАО «Победит» г. Владикавказ и др.).

Одним из условий обработки для всех исследуемых инструментов являлось то, что процесс резания носил прерывистый характер. Для оценки стойкости пластин твердосплавных принималась методика определения ресурсной стойкости, основанная на установлении количества обработанных заготовок одной гранью твердосплавной пластины до величины ее допустимого износа, при котором возникает увеличенная нагрузка при резании, появляется большое количество искр, вибраций, возникает характерный жесткий звук, ломается инструмент. Упрочненные методом АДУ пластины сравнивались с неупрочненными при обработке одних и тех же деталей на одинаковом оборудовании и режимах резания.

На ОАО «Могилевский лифтостроительный завод» проведены испытания твердосплавных пластин формы PNUA-110408 сплава T15K6, упрочненных АДУ, при обработке детали «Клин 402А.43.02.041А». Материал заготовки – сталь 45Л ГОСТ 977-88, стальное литье. Операция – фрезерование боковой поверхности в размер в допуск $\pm 0,02$ мм. Оборудование – станок мод. FSS 400R. Инструмент – фреза торцовая диаметром 100 мм с 8-ю зубьями. Режимы резания: число оборотов шпинделя станка в минуту $n_{\phi} = 900$ об/мин, подача (минутная) $s_{мин} = 800$ мм/мин, снимаемый припуск за один проход $t = 2,0$ мм. Твердосплавные пластины, упрочненные АДУ, проработали всеми 10 гранями, в то время как из 12 штук неупрочненных пластин при работе на 10-й грани четыре пластины вышли из строя в результате скола. Количественные результаты работы каждой гранью пластин представлены на рис. 2. Заводским актом опытно-промышленных испытаний № 26 от 26.03.2019 года подтверждено, что ресурсная стойкость пластин сменных многогранных твердосплавных PNUA-110408 сплава T15K6, упрочненных методом АДУ, при обработке стали 45Л при торцовом фрезеровании в 3,4 раза выше по сравнению с неупрочненными пластинами.

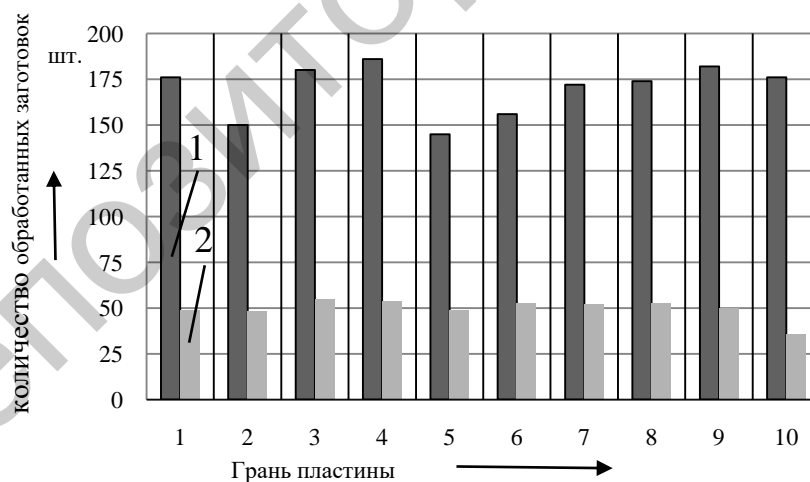


Рисунок 2 – Количество обработанных заготовок «Клин 402А.4302.041А» (сталь 45Л) каждой гранью пластин PNUA-110408 сплава T15K6, упрочненного АДУ (1) и неупрочненного (2)

Обобщенные результаты апробации метода АДУ в производственных условиях, представленные в табл., показали высокую эффективность метода АДУ.

Эффективность метода АДУ исследовалось в производственных условиях ОАО «Беларуськалий» при добыче калийных руд резцами ЛКМЯ 34.359.00-02: диаметр корпуса из стали 40Х по всей высоте резца – 30 мм, диаметр твердосплавной вставки ВК8 – 9 мм.

«ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ 2020»

Вставка закреплялась в державке методом горячей пайки. Резцы устанавливались в кулак, совместно с которым в режущие четырехзаходные органы – левый и правый, по два резца в линии резания, диаметром 1400 мм. Количество установленных кулаков – по 40 штук. Расстояние между линиями реза – 58 мм. Из 300 штук резцов, используемых в испытаниях, 150 штук были без упрочнения и 150 штук были упрочнены методом АДУ. Параметры лавы: вынимаемая мощность – 2,52 м, длина 291 м, угол наклона $\pm 2^\circ$. Проходческий комбайн SL-300/550, фирмы Eickhoff, оснащен подающими электрическими двигателями с частотным регулированием скорости подачи, имеющих мощность 2x550 кВт и подачу 80 кВт. При испытании резцов ЛКМЯ 34.359.00-02 комбайн работал со скоростями 3,68-4,35 м/мин. Ширина захвата составляла от 700 мм до 750 мм.

Производственные испытания в условиях ОАО «Беларуськалий» показали, что на 1000 тонн отбитой руды расход резцов ЛКМЯ 34.359.00-02, упрочненных АДУ, составил 3,5 шт., что в 2,48 раза меньше, чем резцов без АДУ, расход которых равен 8,7 шт. на 1000 тонн.

Таблица 2 – Результаты апробации метода АДУ в производственных условиях

№	Наименование		Режимы обработки			Повышение стойкости, раз
	Упрочненного инструмента	Детали, материала	t, мм	$n_{ф}$, об/мин	$S_{мин}$, мм/мин	
1	2	3	4	5	6	7
ОАО «Могилевский лифтостроительный завод», Республика Беларусь						
1	пластины PNUA-110408 сплава T15K6	Клин (сталь 45Л), 402А.43.02.041А,	2,0	900	800	3,4
2	ножи твердосплавные 2020-0003 T5K10 60° ГОСТ 24359-80	кулачек 1020БК0700.041, сталь 45л	1,0...4,0	315	0,5 мм/об	2,6
3	ножи твердосплавные 2020-0004 T5K10 90° ГОСТ 24359-80	плита 0411Б.0301.091, сталь 20	5,0	800	500	3,8
4	резцы напайные 2184-4024 BK8	вкладыш 0411.03.02.092, СЧ15	0,74	315	0,3 мм/об	1,85
5	пластины WNUM -120612 T15K6	кулачек 1020БК0700.041, сталь 45л	1,0...4,0	315	0,5 мм/об	2,2
6	фрезы для Т-образных пазов 2254-4027 T15K6	клин 0411Б.03.02.101, сталь 45	1,0...4,0	400	70	1,35
7	пуансоны из стали У8	направляющая 287.М 05.00.105К, сталь 20	17			3,3
ЗАО «Промлизинг», Республика Беларусь						
8	пластины PNUA-110408 T15K6	Державка 140x16, сталь 45	1,0...2,0	630	1250	3,1
ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь						
9	пластины PNUM-110408 Н10	заготовки из стали 45, 40Х и 38Х2МЮА	3,0...5,0	200 500	450	1,8
ОАО «Могилевский завод Электродвигатель», Республика Беларусь						
10	пластины PNUM-110408 T5K10	Вал АИР56-АИР180, сталь 45	3,0...3,5	400	0,4 мм/об	2,4
ЗАО «Новые инструментальные решения», г.Рыбинск, Российская Федерация						
11	фрезы концевые M113-00072WH24, M136-120083H25 с PVD TiAlCrN	Сталь Р1Т (12ХН9Т)		135 м/мин		52 %

«ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ 2020»

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит», Республика Беларусь						
12	ножи 2021-0015, ВК8 60° ГОСТ 24359–80	тюбинги Н2Л, Н3Л, чугун СЧ20	3,0...5,0	270	650	2,0
ОАО «Могилевский завод Строммашина», Республика Беларусь						
13	пластины РНУА-110408, ВК8	тюбинги 8,0-80-2; 8,0-80-3 чугун СЧ 30	3,0...3,5	65	128	2,5
ОАО «Победит», г.Владикавказ, Российская Федерация						
14	Пластины 10114-110408, ВК8	заготовки, чугун СЧ 30	1,0	630	315	2,23
15	Пластины 10114-110408, Т15К6	заготовки, сталь 45	1,0	315	125	1,76

Выводы

При эксплуатации в условиях прерывистого резания, с ударными и циклическими нагрузками обеспечивается повышение стойкости в 1,35-3,8 раза, такого твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, как фрезерный, токарный для контурного точения, отрезания, обработки канавок, резьбонарезной, сверлильный, а также практически весь инструмент для горнодобывающей и строительно-дорожной промышленности. Метод АДУ также эффективен в ряде отраслей оборонной промышленности.

Список литературы

1. Жигалов А.Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: монография / А.Н. Жигалов, В.К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 213 с.
2. Нанотехнологии / ВНИИИНСТРУМЕНТ. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vniiinstrument.ru/information/aboutnii/nanotech.php>
3. Российский рынок бурового горного инструмента: тенденции и перспективы развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dprom.online/mtindustry/rossijskij-rynok-burovogo-gornogo-instrumenta>.
4. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. ВУ 21049 / А.Н. Жигалов, Г.Ф. Шатуров, В.М. Головков. – Оpubл. 30.06.2017.
5. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. RU 2557175 / А.Н. Жигалов, Г.Ф. Шатуров, В.М. Головков. – Оpubл. 20.07.2015.
6. Шелег В.К. Инновации при создании метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // материалы X Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в машиностроении» (ИнМаш-2019), 26-29 ноября 2019 г., Кузбасс, 2019. – С. 66 – 72.
7. 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.
8. Шелег, В.К. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали / В.К. Шелег, А.Н. Жигалов // Горная механика и машиностроение – 2019. – № 3. – С. 56 – 65.
9. Жигалов, А.Н. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из чугуна / А.Н. Жигалов, А.А. Жолобов, В.К. Шелег // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3 (64). – С. 36 – 47.

10. Жигалов, А.Н. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на структурно-фазовый состав и плотность дислокаций твердого сплава ВК8 / А.Н. Жигалов, Д.Д. Богдан // Горная механика и машиностроение – 2020. – № 1. – С. 71 – 81.

EFFICIENCY OF AERODYNAMIC AUDIO STRENGTHENING OF A SOLID-ALLOY INSTRUMENT

Sheleg V.K. Chl. NAN Belarusi, D. Sc.. Professor, e-mail: sheleh.v@tut.by

Jigalov A.N. Ph. D. (Technical), Associate Professor, e-mail: jigalov6@mail.ru

Bogdan D.D. Post-graduate Student, Baranovichi State University, e-mail: Dmitri_bogdan@tut.by.

Belarusian National Technical University, 9, B. Hmelnitzkogo str., 220013, Minsk, Republic of Belarus.

Baranovichi State University (62, Parkova Str., 225401, Baranovichi, Republic of Belarus).

Abstract

The problems arising when carbide tools are used to process discontinuous surfaces that can be solved by using the method of aerodynamic sound hardening (ADU) are shown. The physics of the ADU process and its implementation are described. It is shown that the use of the ADU method increases the strength properties of hard alloys: there is an increase in impact strength compared with unstrengthened samples by: 23 % for alloy T15K6; 21 % – for T5K10; 19 % – for VK8; the flexural strength of carbide plates of alloys T5K10, T15K6, VK6, VK8 increases by 19 ... 23 %. When operating in intermittent cutting, with impact and cyclic loads, an increase in resistance of 1.35-3.8 times is provided for such carbide tools hardened by the ADU method as milling, turning for contour turning, cutting, grooving, thread-cutting, drilling, as well as tools for the mining and road construction industries.

Keywords: aerodynamic sound hardening method, hard alloys, interrupted cutting.