

УДК 534.29

**А. Н. ЖАРИКОВ.**

**А. Н. ЖИГАЛОВ**, *д-р техн. наук, доц.*

Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

## РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОГО СПЛАВА МЕТОДОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

### Аннотация

Описана методика расчета интенсивности звуковой энергии для обработки твердого сплава методом аэродинамического звукового упрочнения.

### Ключевые слова:

интенсивность звуковой энергии, аэродинамическое звуковое упрочнение, твердый сплав.

Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [1] основан на обеспечении генерации резонансных волн звуковой частоты по принципу работы газового генератора звука «Свисток Гавро». Упрощенная схема приведена на рис. 1.

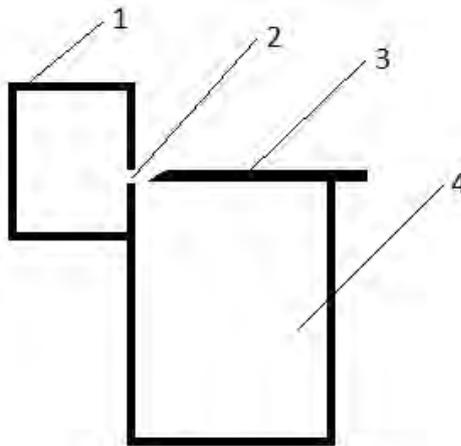


Рис. 1. Упрощенная схема газового генератора звука «Свисток Гавро»: 1 – ресивер; 2 – сопло тонкой прямоугольной формы; 3 – регулировочный нож клиновидной формы (по ширине сопоставимый с длиной сопла); 4 – резонатор прямоугольной формы

Работу газового генератора звука (рис. 1) можно разделить на два такта: такт впуска и такт выпуска. В момент такта впуска из ресивера 1 под давлением подается воздух через сопло 2. Образовавшийся плоский поток воздуха при движении от сопла 2 «разрезается» регулировочным ножом 3 на два потока. Таким образом, часть воздуха попадает в резонатор 4, создавая в нем избыточное давление относительно стационарного (атмосферного) давления, тем самым задавая первую полуволну звукового колебания, при этом увеличивающееся давление воздействует на стенки резонатора 4, которые за счет упругих свойств

начинают накапливать потенциальную энергию (стенки начинают наращивать прогиб наружу). Другая же часть потока за счет эжекционных свойств способствует перекрытию полости резонатора 4, тем самым позволяя нарастить еще большее давление в нем. Второй этап наступает, когда давление в резонаторе 4 превышает по силовым характеристикам перекрывающую способность второй части потока. После чего происходит выброс части воздуха из резонатора 4, что создает разрежение в нем и задает вторую полуволну звукового колебания. При правильной настройке данного генератора частота воздушного сброса-наполнения и собственная частота резонатора 4 (частота колебания стенок) совпадают. Тогда при устоявшемся резонансном режиме работы данного генератора звука к моменту начала сброса воздуха стенки резонатора 4, пройдя равновесное положение, за счет инерционных сил достигают максимального прогиба вовнутрь, тем самым сокращая объем резонатора 4, что значительно увеличивает амплитуду переменного (звукового) давления при положительной полуволне. А к моменту начала наполнения воздухом камеры стенки резонатора 4, также пройдя равновесное положение, но уже в обратную сторону, достигают максимального прогиба наружу, тем самым увеличивая объем камеры, что повышает глубину разрежения.

Различные марки твердого сплава имеют различное содержание основных химических элементов (W, Ti, Ta, Co), которые в свою очередь отличны друг от друга по атомным характеристикам (масса и радиус атома, межатомное расстояние, заряд атома и др.). Данные характеристики влияют на энергию связи атомов в кристаллической решетке, а значит, от них зависит и требуемая энергия для разрыва данных связей в местах дислокаций, которая приводит к изменению равновесного состояния атомов кристаллической решетки и последующему смещению в энергетически более выгодное положение.

Как известно [1], такая энергия определяется максимальной внутренней энергией свободных равновесных колебаний атомов  $E_{свmax}$  и входит в состав следующего неравенства

$$E_T + E_{вн} > E_{свmax}, \quad (1)$$

где  $E_m$  – энергия от температурного воздействия, Дж;  $E_{вн}$  – внешняя энергия от воздействия звуковых волн, Дж.

Из данного неравенства видно, что для смещения атомов кристаллической решетки в энергетически более выгодное положение сумма энергий от температурного воздействия  $E_m$  и воздействия звуковых волн  $E_{вн}$  должна превышать максимальную внутреннюю энергию свободных равновесных колебаний атомов  $E_{свmax}$ .

При использовании метода АДУ энергия от температурного воздействия, передаваемая атому определенного химического элемента, ограничена максимально допустимой температурой подогрева  $T_{дон}$ , достижение которой не приводит к значимому изменению свойств твердосплавного материала и имеет значения до 30 % от температуры спекания  $T_{сн}$  рассматриваемого материала.

Таким образом, энергия от температурного воздействия, приобретаемая атомом некоторого химического элемента, будет иметь следующий вид [1]

$$E_T = 24,94338 \cdot m \cdot (T_{дон} + 273,15), \quad (2)$$

где  $m$  – масса атома некоторого химического элемента, кг.

Согласно формуле (1), энергия внешнего звукового воздействия при использовании АДУ, требуемая для упрочнения рассматриваемых твердосплавных материалов, пригодных для обработки прерывистых поверхностей деталей из чугунов, будет определяться по формуле

$$E_{вн} > E_{свmax} - E_T. \quad (3)$$

Подставив  $E_T$  (2) в правую часть уравнения (3), получим

$$E_{вн} > E_{свmax} - (24,94338 \cdot m \cdot (T_{дон} + 273,15)). \quad (4)$$

Для твердых сплавов максимально допустимые температуры подогрева должны быть не более 30 % от температуры спекания, и не более 320 °С, так как, согласно [1], нагрев до температур, не превышающих 320 °С, предполагает незначительное изменение свойств твердых сплавов (снижение твердости не превышает 1 %...2 %).

Для изменения равновесного состояния всех атомов кристаллической решетки и последующего их смещения в энергетически более выгодное положение для твердых сплавов требуется итоговая внешняя энергия, переданная им от воздействия звуковых волн  $E_{вн}$ , по величине большая, чем энергия  $E_{вн}$ , требуемая для самого энергоемкого химического элемента в упрочняемом сплаве.

Применение АДУ для передачи энергии предполагает использование звуковых резонансных волн, а одной из основных энергетических характеристик звуковой волны является интенсивность звуковой волны  $I$ , то для передачи энергии от внешнего воздействия  $E_{вн}$  каждому дислоцированному атому каждого химического элемента в рассматриваемых сплавах требуется такая интенсивность звуковой волны, при которой итоговая энергия от внешнего воздействия  $E_{вн}$  гарантированно будет пропущена через площадь сечения диаметральной плоскости атома химического элемента  $S_c$  с наименьшим радиусом

$$S_c = \pi \cdot R^2. \quad (5)$$

Интенсивность звуковой волны  $I$  измеряется в Вт/м<sup>2</sup>, но значение мощности отсутствует, однако ватт можно выразить в других единицах измерения:

$$\text{Вт} = \text{Дж/с}. \quad (6)$$

Тогда единицами измерения интенсивности звуковой волны  $I$  будут Дж/(с·м<sup>2</sup>) и формула для нахождения требуемой  $I$  примет следующий вид:

$$I = E_{\text{вн}} / (t_{\text{nn}} \cdot S_c), \quad (7)$$

где  $t_{\text{nn}}$  – время, равное длительности полупериода звуковой волны.

За время  $t_{\text{nn}}$  принимается длительность полупериода по причине того, что за этот интервал времени реализуется максимальный потенциал импульса звуковой волны, передаваемого атому в одном направлении, за это время реализуется размах колебания (рис. 2).

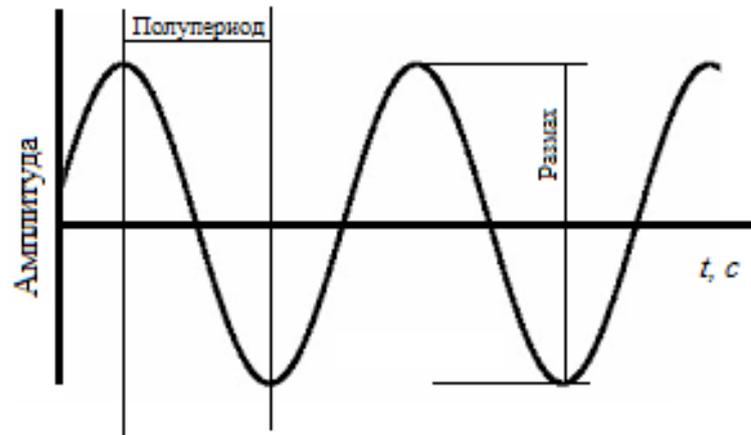


Рис. 2. Иллюстрация звуковой волны

Согласно [2] для резонатора АДУ с коэффициентом затухания  $\delta = 0,094$  оптимальным диапазоном частот для получения резонансных колебаний является 140...170 Гц. Средним значением данного диапазона будет 155 Гц. Данное частотное значение предполагает максимальное значение амплитуды резонанса.

Таким образом, для частоты  $\nu = 155$  Гц значение длительности периода колебания звуковой волны будет определяться по следующей формуле

$$T_{\text{зв}} = 1 / \nu. \quad (8)$$

А значение длительности полупериода – по формуле

$$t_{\text{nn}} = T_{\text{зв}} / 2. \quad (9)$$

При подстановке значений в формулы (8) и (9) для  $\nu = 155$  Гц, с учётом округления, получаем значение длительности полупериода  $t_{\text{nn}} = 3,2258 \cdot 10^{-3}$  с.

Имея для формулы (7) все необходимые значения ( $E_{\text{вн}}$ , Дж;  $t_{\text{nn}}$ , с;  $S_c$ , м<sup>2</sup>), можем получить значение требуемой интенсивности звуковой волны ( $I$ , Вт/м<sup>2</sup>), которая дает возможность смещения атома каждого из основных химических элементов в энергетически более выгодное положение, приводящее к последующей ликвидации дислокаций в объёме материала.

Ввиду того, что расстояния, которые проходит звуковая волна в воздухе и в упрочняемых изделиях из рассматриваемых сплавов малы, то допускаем возможность пренебречь поглощением звука в данных средах, а коэффициент про-

никновения звуковых волн принимаем за единицу [3]. Тогда значение требуемой интенсивности звуковой энергии, производимой резонатором, будет равным значению интенсивности звуковой энергии, требуемой для возможности смещения атома каждого из основных химических элементов в энергетически более выгодное положение ( $I_p = I$ ).

Стоит отметить, что значение требуемой интенсивности звуковой волны  $I$  достаточно при условии сохранения максимально допустимой температуры  $T_{дон}$  (температуры подогрева) и при условии совпадения направления теплового колебания атома, направления приложенного к атому импульса от внешнего звукового воздействия, перпендикулярного к фронту распространения звуковой волны, и направления, в котором увеличено межатомное расстояние из-за наличия дислокации.

С учетом сложного теплового колебательного движения атомов в кристаллической решетке [4] и значительной максимальной частоты колебаний ( $1,46...2,58 \cdot 10^{13}$  Гц) для основных атомов твердсплавных материалов [1], можно допустить, что вектор теплового колебательного движения атомов и вектор импульса от внешнего звукового воздействия в любой рассматриваемый момент времени являются сонаправленными. При этом направление, в котором увеличено межатомное расстояние из-за наличия дислокации, и направление приложенного к атому импульса от внешнего звукового воздействия совпадают в ограниченном количестве случаев. Ввиду того, что в пределах объема изделия, состоящего из поликристаллов, дислокации с высокой степенью вероятности имеют разную пространственную ориентацию, применение базового метода АДУ не позволяет полностью ликвидировать имеющиеся дислокации по всему объему изделия. Однако, если снабдить установку АДУ механизмом, реализующим сложное движение (например вращение вокруг двух перпендикулярных осей) упрочняемого изделия, можно добиться такой структуры материала, которая по наличию дислокаций (как минимум в пределах зерна) будет максимально приближена к структуре металлических усов (монокристалла). Такая структура отличается большой прочностью и стремится к максимальному теоретическому (недостижимому) значению прочности для конкретного материала. Зависимость прочности материала от плотности дислокаций приведена на рис. 3 [5].

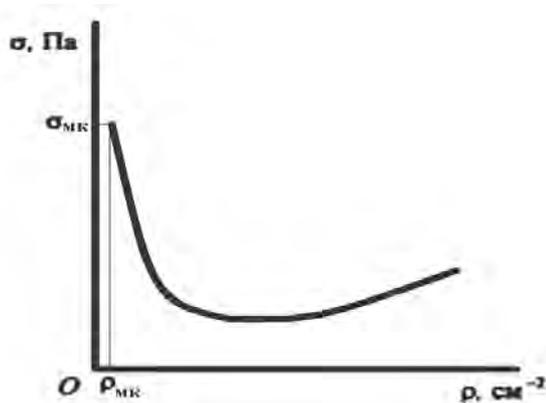


Рис. 3. Зависимость прочности материала от плотности дислокаций

Стоит так же отметить, что процесс звукового воздействия при использовании АДУ требует некоторой продолжительности по времени, в течение которого упрочняемое изделие теряет некоторое количество тепловой энергии, что обедняет колебательную энергию атомов. Это вызывает потребность в её компенсации за счёт повышения интенсивности внешней звуковой энергии от резонатора. Данное повышение не предусмотрено базовым методом АДУ и в принципе является трудно реализуемым. Однако, одним из путей решения задачи по восполнению колебательной (тепловой) энергии атомов может являться оснащение установки АДУ индукционным, либо инфракрасным подогревателем, установленным внутри резонансной камеры.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ 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. **Жигалов, А. Н.** К теории аэродинамического упрочнения: колебательные процессы в кристаллической решетке твердых сплавов / А. Н. Жигалов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 3 (60). – С. 77–86.
3. Звук и акустика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ссылка на сайт <http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/b641a27b-9866-7427-56f3-1d067e7426f7/1002314A.htm>. – Дата доступа: 30.06.2023.
4. **Шиманский, В. И.** Основы физики твердого тела: учеб.-метод. пособие / В. И. Шиманский, Е. П. Туромша, Н. Н. Кольчевский. – Минск: БГУ, 2021. – 207 с.
5. Материаловедение и технология металлов: учебник для студ. вузов, обуч. по машиностроит. спец. / Г. П. Фетисов [и др.]. – Москва: Высшая школа, 2001. – 640 с.: ил.

Контакты:

Artyom\_Zhan@mail.ru (Жариков Артем Николаевич);  
jigalov6@mail.ru (Жигалов Анатолий Николаевич).