

ВНЕДРЕНИЕ КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В МАТЕРИАЛ ОСНОВАНИЯ ПРИ СОВМЕЩЕННОМ УДАРНОМ И УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., канд. тех. наук, доц. ДРОЗДОВ А. В., студ. КАЧАН Е. О.

Белорусский национальный технический университет

Операция шаржирования, т. е. насыщение обрабатываемой поверхности твердыми абразивными (алмазными) частицами, широко используется при производстве различного инструмента, в частности распиловочных и ограждающих дисков, применяемых в процессах обработки монокристаллов алмаза, а также разных доводочных и притирочных инструментов, используемых на финишных операциях формообразования прецизионных поверхностей.

Рабочие поверхности данных инструментов должны обладать высокой режущей способностью и износостойкостью, а также обеспечивать высокое качество обработанных на них поверхностей деталей. Уровень эксплуатационных показателей таких поверхностей определяется качеством выполнения операции их шаржирования, которое характеризуется размером и количеством внедрившихся в материал поверхности абразивных (алмазных) частиц, прочностью их закрепления в нем, а также их разновысотностью.

Как показали результаты исследований [1–3], эффективным способом повышения качества шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков является применение на этой операции энергии ультразвука путем сообщения колебаний деформирующим инструментам в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности. В этом случае благодаря виброударному режиму взаимодействия инструментов с обрабатываемой поверхностью в процессе ее шаржирования реализуются условия виброударного втирания алмазных частиц в материал диска, которые в сравнении с традиционными обеспечивают формирование алмазосодержащего покрытия с более высокими эксплуатационными характеристиками, т. е. повышают качество шаржирования поверхностей.

Во всех предшествующих исследованиях использовались акустические колебательные системы разомкнутого типа, в которых деформирующий инструмент жестко не связан с выходным торцом концентратора ультразвукового излучателя, а установлен свободно между ним и обрабатываемой поверхностью. При определенной интенсивности ультразвукового возбуждения такой системы взаимодействие ее звеньев представляет собой совокупность периодически повторяющихся переходных процессов «затягивания» системы по амплитуде на виброударный режим и последующего «срыва» с него [4]. При таком режиме деформирующий инструмент (промежуточное звено) совершает низкочастотные колебания значительной амплитуды, чем обеспечивается гарантированное попадание абразивных (алмазных) зерен в зону шаржирования, а их последующее внедрение в обрабатываемую поверхность происходит за счет дополнительного воздействия на них высокочастотных (ультразвуковых) колебаний на стадии «затягивания» системы на виброударный режим работы. Следовательно, в этом случае значительная часть подводимой акустической энергии затрачивается на поддержание виброударного режима взаимодействия звеньев колебательной системы, что снижает эффективность использования ультразвука с целью интенсификации процесса внедрения твердых частиц в обрабатываемую поверхность. Помимо этого, на интенсивность виброударного режима работы акустической колебательной системы существенное влияние оказывают технологические параметры процесса шаржирования, в частности статическое усилие прижатия деформирующего инструмента к обрабатываемой поверхности и скорость их относительного скольжения, с увеличением которых она снижается. Это, в свою очередь, сопровождается

уменьшением доли подводимой акустической энергии, расходуемой непосредственно на процесс внедрения абразивных (алмазных) частиц в шаржируемую поверхность.

Для повышения эффективности применения энергии ультразвука в процессе шаржирования поверхностей авторами [5] предложено использовать акустические колебательные системы замкнутого типа, когда деформирующий инструмент жестко связан с выходным торцом концентратора ультразвукового излучателя, а для обеспечения гарантированного попадания частиц абразивного материала в зону обработки сообщать инструментам низкочастотные колебания значительной амплитуды от отдельного привода. Причем внедрение абразивных (алмазных) частиц в шаржируемую поверхность осуществляется при воздействии УЗК, начиная с момента соударения с ней инструмента до наступления их разрыва за счет низкочастотных колебаний, т. е. с периодическим сообщением ультразвуковых колебаний деформирующему инструменту.

Исходя из этого целью данной работы явилось теоретическое и экспериментальное исследование влияния ударного и последующего ультразвукового воздействия на глубину внедрения индентора в материал жесткопластичного основания.

Для математического описания процесса внедрения алмазного зерна в материал подложки при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях воспользуемся расчетной схемой, представленной на рис. 1.

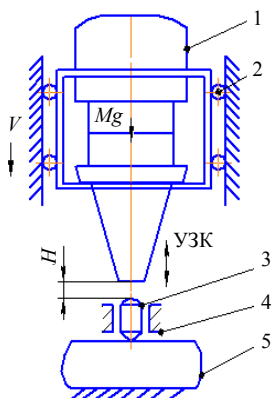


Рис. 1. Расчетная схема для математического описания процесса внедрения алмазного зерна в материал подложки при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях

Алмазное зерно моделируется жестким индентором 3 в виде конического элемента с углом при вершине 2β . Ультразвуковой излучатель 1 установлен на идеальной направляющей 2 и с помощью системы противовесов находится в уравновешенном виде. Для создания удара на него устанавливается груз определенной массы, под действием веса которого, падая с высоты H , излучатель ударяет по индентору, внедряя его. В момент контакта индентору сообщаются ультразвуковые колебания, которые участвуют в его последующем внедрении в жесткопластичное основание 5.

Для расчета данной системы воспользуемся законом сохранения энергии

$$\frac{Mv^2}{2} = MgH, \quad (1)$$

где M – масса груза; v – скорость падения груза; g – ускорение свободного падения; H – высота.

Из уравнения (1) выразим v

$$v = \sqrt{2gH}. \quad (2)$$

В свою очередь из закона сохранения количества движения имеем

$$Mv = (M + m)U, \quad (3)$$

где m – масса индентора; U – скорость индентора и излучателя после удара.

Глубина внедрения индентора в жесткопластичное основание составит

$$h_y = \frac{4MgH}{(F - Mg) \left(\frac{m}{M} + 1 \right)^2}, \quad (4)$$

где F – сопротивление основания.

Из условия равновесия (рис. 2) имеем

$$dF = (T \cos \beta + N \sin \beta) dS. \quad (5)$$

С учетом того, что масса индентора очень мала по сравнению с массой груза, ею можно пренебречь. Тогда (4) переписывается в виде

$$h_y = \frac{4MgH}{F - Mg}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что глубина внедрения индентора в жесткопластичное основа-

ние зависит от массы груза M , высоты подъема концентратора над основанием H и жесткости основания F .

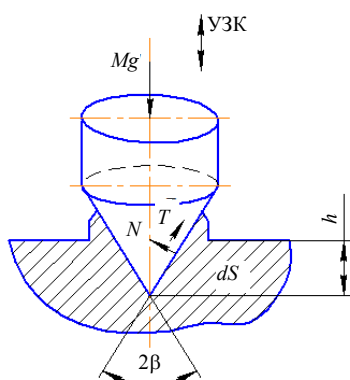


Рис. 2. Схема сил, действующих на конический индентор

При подаче ультразвуковых колебаний количество импульсов будет определяться по формуле

$$n_p = \frac{t_b}{T} = f_{ak} t_b, \quad (7)$$

где t_b – время воздействия ультразвуковых колебаний от начала контакта преобразователя с индентором до его разрыва; f_{ak} – частота ультразвуковых колебаний.

Для определения глубины внедрения индентора при воздействии УЗК воспользуемся формулой, полученной авторами [3] для расчета аналогичного параметра при внедрении индентора с углом при вершине 2β , жестко связанного с выходным торцом ультразвукового преобразователя. Так, глубина вибропогружения индентора в зависимости от продолжительности ультразвукового воздействия равна

$$h_{ak} = \frac{1 - k^{n-1}}{1 - k} \left(\frac{A_0 c - 2F}{c} \right), \quad (8)$$

где n – количество циклов ультразвукового воздействия на индентор; c – жесткость выходного торца концентратора; $k = 1 - \frac{\alpha_b}{c}$ – безразмерный коэффициент; α_b – коэффициент контактной жесткости основания ($\alpha_b \ll c$); A_0 – амплитуда ультразвуковых колебаний.

С учетом того, что $n = n_p$, формула (8) перепишется в виде

$$h_{ak} = \frac{1 - k^{n_p f_{ak}^{-1}}}{1 - k} \left(\frac{A_0 c - 2F}{c} \right). \quad (9)$$

Глубина внедрения индентора в материал при однократном ударном нагружении и последующем ультразвуковом воздействии будет равна

$$h = h_y + h_{ak}. \quad (10)$$

С учетом формул (6) и (9) уравнение (10) примет вид

$$h = \frac{4MgH}{F - Mg} + \frac{1 - k^{n_p f_{ak}^{-1}}}{1 - k} \left(\frac{A_0 c - 2F}{c} \right). \quad (11)$$

Полученная формула позволяет рассчитать глубину вдавливания индентора в зависимости от массы груза и высоты подъема излучателя над жесткопластичным основанием, а также амплитуды и частоты сообщаемых индентору ультразвуковых колебаний. При этом первое слагаемое уравнения (11) представляет собой кинематическую (ударную) составляющую процесса внедрения индентора, а второе слагаемое является ультразвуковой составляющей.

По результатам численного исследования выражения (11) получены теоретические зависимости глубины внедрения индентора в поверхность жесткопластичного основания от массы грузов m , времени воздействия ультразвуковых колебаний t и амплитуды ультразвуковых колебаний A_0 , которые представлены на рис. 3. Они получены при вариации значений: массы грузов $m = 0-0,5$ кг; $H = 12$ мм; времени воздействия ультразвуковых колебаний $t = 0-5$ с; амплитуды ультразвукового воздействия $A_0 = 0-40$ мкм.

Из анализа этих зависимостей видно, что с увеличением массы грузов (рис. 3а) и времени воздействия ультразвуковых колебаний (рис. 3б), а также амплитуды ультразвукового воздействия (рис. 3в) глубина внедрения индентора увеличивается.

С увеличением массы грузов возрастает кинетическая энергия системы (грузы – концентратор – индентор), что приводит к повышению импульса силы, а соответственно к возрастанию глубины внедрения индентора в жесткопластичное основание.

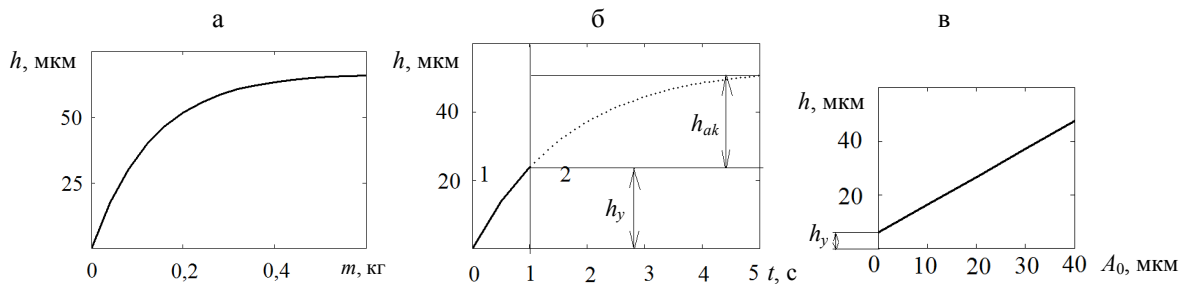


Рис. 3. Теоретические зависимости глубины внедрения индентора в поверхность жесткопластичного основания от: а – массы грузов m при однократном ударном нагружении; б – времени воздействия ультразвуковых колебаний t ; в – амплитуды ультразвукового воздействия A_0

Но, как видно из зависимости рис. 3а, с дальнейшим возрастанием массы грузов глубина внедрения индентора устанавливается на постоянном (критическом) уровне. Этот уровень характеризует начало процесса разрушения абразивных (алмазных) зерен под действием низкочастотной составляющей колебаний.

На рис. 3б представлена зависимость глубины внедрения индентора в материал жесткопластичного основания при его однократном ударном нагружении с последующим ультразвуковым воздействием, которая характеризуется наличием двух стадий.

Стадия 1 отражает процесс внедрения (наживления) индентора под действием ударной (низкочастотной) составляющей, а стадия 2 характеризует процесс его последующего внедрения в результате ультразвукового воздействия. При этом на первой стадии внедрение индентора на глубину h происходит практически мгновенно, в то время как на второй стадии этот процесс во времени протекает более медленно. Такой режим погружения абразивных (алмазных) зерен обеспечивает их внедрение в материал подложки на большую, чем при однократном ударе, глубину при сохранении их целостности, т. е. без разрушения, что способствует повышению качества шаржирования поверхности.

С увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний A_0 глубина внедрения индентора становится больше (рис. 3в). Как следует из формулы (11), при прочих равных условиях увеличение глубины внедрения определяется соотношением $\frac{A_0 c - 2F}{c}$, которое можно пред-

ставить в виде $A_0 - 2\Delta_n$, где $\Delta_n = \frac{F}{c}$ – величина

на натяга в акустической колебательной системе, обусловленная внедрением индентора в результате однократного удара. Поэтому чем больше неравенство $A_0 > 2\Delta_n$, тем выше степень влияния ультразвуковых колебаний на увеличение глубины внедрения индентора в материал подложки. Если $A_0 = 2\Delta_n$, то ультразвук не оказывает влияния на увеличение глубины внедрения индентора, полученной после однократного ударного воздействия. Отмеченные положения необходимо учитывать при назначении параметров ударного (низкочастотного) и ультразвукового (высокочастотного) воздействий на абразивные (алмазные) зерна в процессе их шаржирования.

С целью подтверждения результатов теоретических исследований была проведена серия сравнительных экспериментов по внедрению индентора в поверхность образца инструментом, которому сообщались низкочастотные и ультразвуковые колебания, направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Для этого была создана специальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 4.

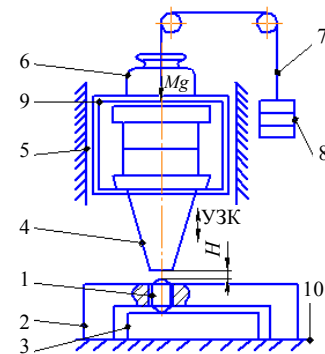


Рис. 4. Схема установки для определения глубины внедрения индентора при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях

Она состоит из неподвижного основания 10, на котором закрепляется испытуемый образец 3 в виде прямоугольного параллелепипеда, изготовленного из свинца (аналог жесткопластичного основания). С кареткой связана опорная плита 2, имеющая отверстие, в которое с гарантированным зазором устанавливается твердосплавный (ВК6) индентор 1 диаметром $d = 2$ мм (аналог абразивного зерна). Своей заточенной конической частью (угол при вершине $2\beta = 90^\circ$) он контактирует с поверхностью свинцового образца, а его противоположный, скругленный конец взаимодействует с поверхностью торца концентратора 4 в процессе удара под действием силы G . Корпус ультразвукового излучателя 9 смонтирован на подвижной части 5 направляющих скольжения (типа «ласточкин хвост»), обеспечивающих его перемещение вдоль вертикальной оси. Уравновешивание системы происходит с помощью аттестованных грузов 8 и трособлочной системы 7. Низкочастотную составляющую колебаний осуществляли с помощью груза 6 определенной массы, установленного на подвижной части направляющей 5.

Методика проведения экспериментов включала последовательное выполнение действий. Свинцовый образец с полированной поверхностью закрепляли на неподвижном основании, затем на него устанавливали опорную плиту с индентором таким образом, чтобы его скругленная часть выступала над поверхностью плиты на 2 мм. После этого система поднималась на фиксированную высоту $H = 12$ мм. С помощью сменных грузов устанавливалось требуемое значение силы тяжести. После этого система получала свободный вертикальный ход, и концентратор с известным усилием воздействовал на скругленную часть индентора, происходило вдавливание его конической вершины в поверхность свинцового образца.

Для выполнения каждого последующего эксперимента свинцовый образец переустанавливался на основании таким образом, чтобы вдавливание индентора происходило на новом участке его поверхности. В одной серии экспериментов вдавливание индентора осуществлялось только с помощью низкочастотной составляющей колебаний, а в другой – при сообщении ему ультразвуковых колебаний в момент контакта концентратора с индентором.

После завершения экспериментов свинцовый образец снимали и с помощью микроскопа

МИМ-5 измеряли диаметры отпечатков, полученных на его поверхности. За окончательное значение этого параметра принимали среднее арифметическое результатов измерения диаметра отпечатка $d_{\text{отп}}$; измеряли угол при вершине конического индентора 2β , вычисляли глубину внедрения $h = \frac{d_{\text{отп}}}{2\text{tg}\beta}$.

На рис. 5 представлены экспериментально полученные зависимости глубины внедрения индентора в поверхность свинцового образца при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях в зависимости от массы грузов m и времени воздействия ультразвуковых колебаний t .

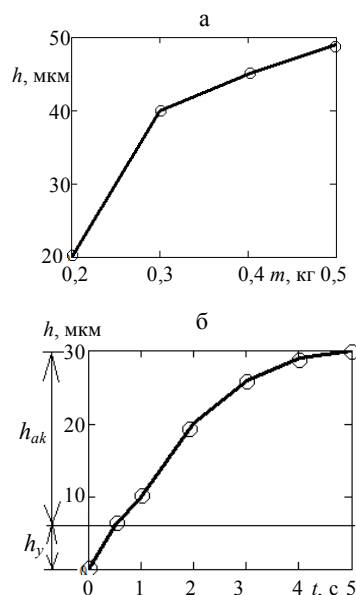


Рис. 5. Экспериментальные зависимости глубины внедрения индентора в поверхность жесткопластичного основания от: а – массы грузов m при однократном ударном нагружении; б – времени воздействия ультразвуковых колебаний t

Как видно из зависимостей, при повышении массы грузов (рис. 5а) глубина внедрения увеличивается, стремясь к некоторому пороговому значению. При повышении продолжительности воздействия ультразвуковой составляющей колебаний (рис. 5б) глубина внедрения также увеличивается.

Таким образом, полученные экспериментальные зависимости полностью согласуются с результатами теоретических исследований (рис. 3), чем подтверждается достоверность разработанной математической модели процесса внедрения индентора в поверхность жесткопла-

стичного основания при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях.

ВЫВОДЫ

1. Предложена расчетная схема вдавливания конического индентора (модель алмазного зерна) в жесткопластичное основание (модель шаржируемой поверхности при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях, на основе которой разработана математическая модель, описывающая этот процесс.

2. С использованием этой модели получено выражение, позволяющее рассчитать глубину внедрения индентора в материал жесткопластичного основания при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях, учитывая параметры ударного нагружения (масса груза и высота его падения), а также амплитуду колебаний, их частоту и продолжительность ультразвукового воздействия. На основе результатов численного исследования данного выражения получены теоретические зависимости, позволяющие проанализировать и количественно оценить влияние перечисленных параметров на глубину внедрения конического индентора в жесткопластичное основание.

3. Установлено, что на первой стадии (ударного нагружения) внедрение индентора происходит практически мгновенно, в то время как на второй стадии (ультразвукового воздействия) этот процесс во времени протекает более медленно. Показано, что такой режим нагружения абразивных (алмазных) зерен обеспечивает их внедрение в материал подложки на большую, чем при однократном ударе, глубину при сохранении их целостности, т. е. без разрушения, что способствует повышению качества шаржирования поверхности.

4. Установлено, что влияние ультразвукового воздействия на увеличение глубины внедрения индентора наблюдается в том случае, когда амплитуда колебаний (A_0) превышает удвоенную величину натяга (Δ_n) в акустической колебательной системе, обусловленную глубиной внедрения индентора в жесткопластичное основание на предшествующей стадии его ударного нагружения, т. е. $A_0 > 2\Delta_n$. По мере увеличения этого неравенства за счет повышения амплитуды колебаний или уменьшения глубины ударного (низкочастотного) и ультразвукового (высокочастотного) воздействий на абразивные (алмазные) зерна в процессе их шаржирования.

5. Создана оригинальная установка и разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющие определять глубину внедрения твердосплавного (ВК6) конического индентора в поверхность свинцового образца при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях при различных значениях их параметров.

6. На основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что рассматриваемый режим нагружения индентора позволяет за счет изменения параметров ударного и последующего ультразвукового воздействий в широком диапазоне управлять глубиной и интенсивностью его внедрения в поверхность свинцового образца. В частности, по сравнению с однократным ударным нагружением последующее ультразвуковое воздействие существенно (более чем в два раза) увеличивает глубину внедрения индентора. Полученные экспериментальные зависимости полностью согласуются с результатами теоретических исследований, чем подтверждается достоверность разработанной математической модели процесса внедрения конического индентора в поверхность жесткопластичного основания при однократном ударном и последующем ультразвуковом воздействиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев, М. Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов. – Минск: Тесей, 2001. – 344 с.
2. Киселев, М. Г. Определение оптимальных режимов двустороннего шаржирования с ультразвуком боковых поверхностей распиловочных дисков по их абразивной способности / М. Г. Киселев, А. А. Новиков, Д. А. Степаненко // Вестник БНТУ. – 2005. – № 3. – С. 34–39.
3. Киселев, М. Г. Определение оптимальных режимов ультразвукового шаржирования распиловочных дисков с фрикционной передачей вращающего момента по их абразивной способности / М. Г. Киселев, А. А. Новиков, Д. А. Степаненко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. асп., магистр, и студ., Могилев, 27 января 2005 г. / ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 54–55.
4. Розенберг, Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука: в 3 ч. – Ч. 1: Источники мощного ультразвука / Л. Д. Розенберг. – М.: Наука, 1967. – 320 с.
5. Киселев, М. Г. Математическое моделирование процесса контактного взаимодействия тел в условиях ультразвукового нагружения / М. Г. Киселев, В. А. Ибрагимов // Приборостроение. – 1989. – № 11. – С. 98–102.

Поступила 22.11.2011