

УДК 621.77

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПЛАСТИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

*Академик, докт. техн. наук, проф. КЛУБОВИЧ В. В.,  
докт. техн. наук САКЕВИЧ В. Н., асп. ТОВПЕНЕЦ И. А.*

*ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»*

Наиболее эффективно применение ультразвуковых колебаний в процессах обработки металлов давлением для изделий малых размеров (характерное сечение площадью менее 1–3 мм<sup>2</sup>), что связано с ограниченностью статических усилий, воспринимаемых ультразвуковой колебательной системой, при которых она может эффективно работать [1]. Малые размеры изделий усложняют и удорожают проведение натуральных исследований с наложением ультразвуковых колебаний по изучению закономерностей формоизменения металлов; влияния различных схем напряженно-деформированного состояния на поведение металла; распределения напряжений и деформаций в очаге деформаций; новых технологических процессов. Любое экспериментальное исследование представляет собой наблюдение за каким-либо явлением и не позволяет составить суждения относительно протекания подобного явления в условиях, отличающихся от условий эксперимента. Только путем эксперимента, поставленного на основе теории подобия и принципа размерностей, можно получить закономерно обобщенные выводы и установить строгие границы их применения. Ценность теории подобия заключается в том, что она устанавливает методы постановки эксперимента и обработки его результатов при изучении вопросов, не поддающихся строгому математическому анализу. Также теория подобия с ее общими методическими указаниями является фундаментальной основой теории моделирования.

Цель моделирования процессов обработки металлов давлением с наложением ультразвуковых колебаний – раскрытие закономерностей протекания реального процесса путем замены изучения явлений в натуре на более простое и дешевое изучение аналогичных явлений на моделях большего масштаба в лабораторных условиях.

Основы учения о подобии были заложены И. Ньютоном, который изложил принципы механического, кинематического и динамического подобия. Развитые А. А. Ильюшиным положения теории моделирования для пластически формоизменяемых материалов исходят из законов подобия, в силу которых протекание процесса в модели происходит подобно протеканию процесса в натуре, если известно что: 1) модель геометрически подобна натуре; 2) граничные и начальные условия (условия однозначности) для величин, характеризующих процесс в модели, подобны таковым для аналогичных величин в натуре; 3) критерии подобия, составленные из величин, входящих в условия однозначности для модели, равны критериям подобия для природы [2].

Для выбора модели необходима разработка рабочей гипотезы, т. е. научное предположение о механизмах воздействия ультразвуковых колебаний на процессы обработки металлов давлением и его вероятное объяснение.

Многочисленными экспериментами [3, 4] установлено, что воздействие ультразвуковых колебаний приводит к существенному снижению

статических сил, необходимых для пластического деформирования материала.

Описанный эффект снижения статического усилия пластического деформирования подтвержден многочисленными экспериментами [3–5]. Во всех экспериментах возбуждались колебания с обычными для ультразвуковых технологических систем частотами ~20–40 кГц и амплитудами ~10–20 мкм. Колебания со столь высокими частотами и малыми амплитудами неразличимы невооруженным глазом, и у наблюдателя создается впечатление, что под влиянием ультразвука происходят размягчение материала, изменение его упругопластических свойств. Существенно, что такое размягчение наблюдается только во время действия колебаний и носит обратимый характер.

Достигнутое в отдельных экспериментах снижение статической нагрузки вплоть до нуля [3] послужило основанием для разработки ряда гипотез о механизмах воздействия ультразвука на материал. В одних гипотезах предполагаются влияние ультразвука на внутреннюю структуру материала, распределение и подвижность дислокаций. В других – повышение пластичности связывают с тепловыми эффектами, вызванными рассеянием энергии при возбуждении высокочастотных колебаний образца. Однако подобные гипотезы не позволяют с достаточной степенью приближения объяснить наблюдаемые эффекты, и хотя указанные причины нельзя отвергать категорически, в рассматриваемых процессах они могут играть, по-видимому, лишь второстепенную роль. Такое утверждение основано на том, что применяемые в экспериментах частоты порядка  $10^4$ – $10^5$  Гц слишком далеки от диапазона  $10^8$ – $10^{10}$  Гц, в котором возможно активное воздействие колебаний на кристаллическую решетку и дислокационные линии. Поэтому весьма вероятно, что наблюдаемое иногда при кристаллографических исследованиях образцов, подвергнутых ультразвуковому воздействию, изменение структуры материала и плотности дислокаций является не причиной аномального поведения материала в ультразвуковом поле, а следствием произведенной пластической деформации.

Относительно влияния тепловых эффектов отметим, что снижение статической силы наблюдается и в случае принудительного поддер-

жания постоянной комнатной температуры [6]. Поэтому в [5, 6] указано, что тепловой эффект не может рассматриваться в качестве основного фактора снижения предела текучести под влиянием ультразвука.

В [7] предлагается подход к описанию процесса пластического деформирования при действии высокочастотной вибрации, основанный на использовании реологических моделей материалов, успешно применяемых при исследованиях колебаний упругопластических тел и ударных явлений.

Проведенный анализ создает ясную картину экспериментально наблюдаемого эффекта «разупрочнения» материала при ультразвуковом воздействии, заключающегося в снижении статического усилия пластического деформирования. Суть этого явления связана с тем, что в каждом цикле нагружения кратковременно преодолевается предел текучести и возникает малая остаточная деформация, накапливающаяся от цикла к циклу. Если следить только за постоянной составляющей силы деформирования и медленным течением процесса, как это и делается в большинстве экспериментов, то создается впечатление о снижении предела текучести материала.

Наблюдаемое явление – это кажущееся разупрочнение материала, упругопластические свойства которого остаются неизменными. Такое поведение материала в условиях ультразвукового воздействия является проявлением известного эффекта вибрационного сглаживания нелинейностей [8–10]. Этот эффект давно используется в технике, хотя и при более низких частотах (в частности, сверление отверстий в бетонных стенах дрелью с перфоратором, разрушение твердой породы отбойным молотком). В пользу кажущегося локального снижения предела текучести говорят и эксперименты по осадке образцов до разрушения из различных труднодеформируемых материалов в обычных условиях и при наложении ультразвуковых колебаний, когда очаг деформации расположен либо в пучности смещений, либо в пучности напряжений. Например, в [5] показано, что при осадке образцов из САП-1, АЛ-10В, МА2 истинные напряжения при наложении ультразвуковых колебаний снижаются в 1,5 и более раз в зависимости от схемы подведения ультразвука,

а максимальная степень деформации до разрушения с наложением ультразвука имеет меньшее значение (примерно на 16 % и более), чем предельная степень деформации при открытом осаживании без ультразвука.

Таким образом, при моделировании какого-либо процесса обработки металлов давлением с наложением ультразвуковых колебаний можно считать, что фактические упругопластические свойства металла остаются неизменными в процессе обработки под действием ультразвука.

Второй аспект, на который следует обратить внимание, – это импульсное, или виброударное, деформирование при обработке металлов давлением с наложением ультразвуковых колебаний.

В качестве примера рассмотрим моделирование процесса свободного осаживания заготовки между двумя плоскопараллельными плитами с наложением ультразвуковых колебаний [5]. На рис. 1 показан свинцовый образец после деформации с наложением ультразвука [5], а на рис. 2 – пластилиновая модель после деформации несколькими ударами бойка по расплюсченному торцу.



Рис. 1. Свинцовый образец после деформации с наложением ультразвука



Рис. 2. Пластилиновая модель

Протекание процесса свободного осаживания в модели произойдет подобно протеканию процесса в натуре, если модель будут нагружать импульсами.

Таким образом, при изучении различных процессов обработки металлов давлением с наложением ультразвуковых колебаний можно использовать все приемы экспериментальных исследований, применяемые при обычной обработке давлением, а при моделировании процессов необходимо помнить об импульсном нагружении.

При проектировании новых или улучшении существующих технологических процессов об-

работки металлов давлением с наложением ультразвуковых колебаний приходится тщательно анализировать закономерности формирования деформируемого тела. В подавляющем числе случаев аналитический анализ не может быть проведен полностью даже при современном состоянии математической и прикладной теории пластичности и наличии большого количества прикладных программ для численных расчетов. Поэтому при решении поставленных задач (например, по формообразованию режущего клина различной конфигурации) приходится применять экспериментальные методы исследования, в частности метод слоистых моделей [2]. Разноокрашенные, одинаковые по толщине и механическим свойствам пластилиновые слои (рис. 3) образуют сплошное строение податливой формоизменению и физическому резу пластилиновой модели, изготовленной по специально разработанной рецептуре и технологии [2]. Располагая после физического реза на плоскости искаженной деформацией, картиной размещения слоев, т. е. системой кривых разграничения соседних разноокрашенных слоев, можно на основании исходной картины расположения этих слоев и закона постоянства сохранения объема рассчитать и построить систему других линий, перпендикулярных первой системе, и получить, таким образом, на плоскости реза сетку. Задача сводится к обработке этой сетки и последующим расчетам деформированного состояния пластилиновой модели. В дальнейшем можно говорить о сопоставлении напряженно-деформированного состояния пластилиновой модели и металлической детали исходя, с одной стороны, из геометрического подобия их формоизменения, а с другой – из известной по данным испытаний на простое растяжение диаграмме  $\sigma_i - e_i$  для металла.

Иначе говоря, в первом приближении этой диаграммой можно воспользоваться при определении  $\sigma_i$  по значению  $e_i$  для пластилина на том основании, что стадии конечного формоизменения для обоих материалов определяются по чисто геометрическим признакам, одинаковым как для металла, так и для пластилина. Методика расчета слоистых пластилиновых моделей приведена в [2].

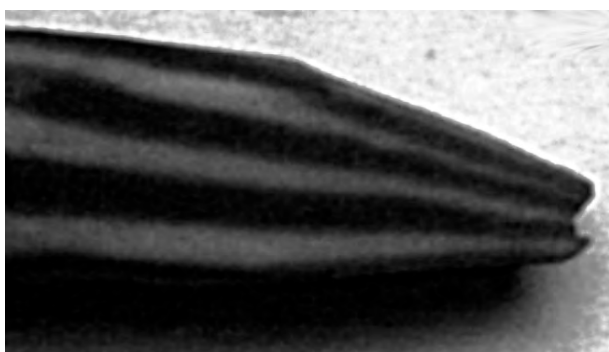


Рис. 3. Разрез пластилиновой многослойной заготовки, продеформированной на установке, моделирующей виброударную ультразвуковую ковку

В ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси» в лаборатории ультразвуковой обработки разработана и изготовлена установка для моделирования процессов обработки металлов давлением с наложением ультразвуковых колебаний, а также компьютерная программа обработки фотоснимков пластилиновых слоистых моделей с целью тщательного анализа процесса деформации формоизменяемого тела и его напряженного состояния. Как примеры формообразования режущего клина показаны на рис. 3 разрезы пластилиновой многослойной заготовки, продеформированной на установке, моделирующей ультразвуковую ковку, а на рис. 4 – обычной осадкой.

Следует обратить внимание на различие в затекании металла в клин при формоизменении заготовки в виброударном и обычном режимах.

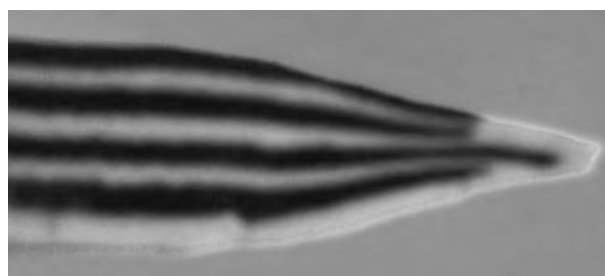


Рис. 4. Разрез пластилиновой многослойной заготовки, продеформированной обычной осадкой

Нами моделировались различные схемы наложения ультразвуковых колебаний и направление движения инструмента. Во всех схемах, которые показаны на рис. 5, взаимодействие инструмента и заготовки осуществлялось в виброударном режиме. Схема 1: бойки 2 вибрируют в противофазе относительно друг друга (схема направления вибраций  $a$ ) и движутся синхронно в направлении  $V_1$ . Схема 2: бойки 2 как единый инструмент вибрируют в направлении, перпендикулярном к формируемой кромке (схема направления вибраций  $b$ ) и движутся в направлении  $V_1$ . Схема 3: бойки 2 как единый инструмент вибрируют в направлении, параллельном к формируемой кромке (схема направления вибраций  $c$ ) и движутся в направлении  $V_1$ . Схема 4: бойки 2 как единый инструмент вибрируют в направлении, перпендикулярном к формируемой кромке (схема направления вибраций  $b$ ) и движутся в направлении  $V_2$ .

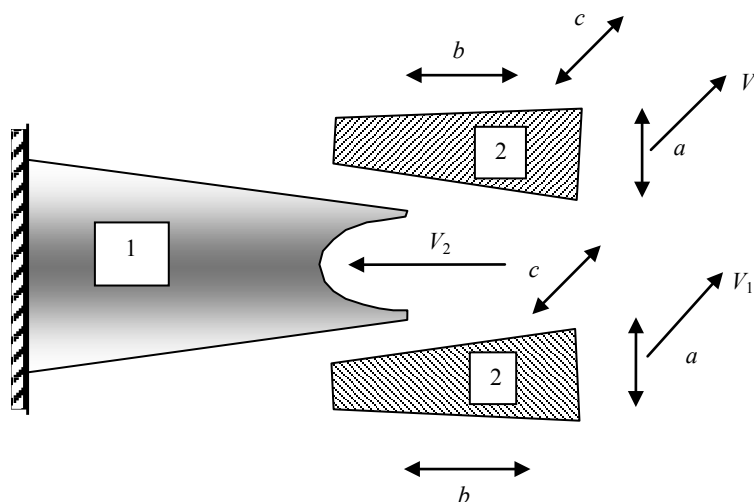


Рис. 5. Схемы виброударного деформирования пластилиновой заготовки: 1 – заготовка; 2 – инструмент;  $a, b$  и  $c$  – направления вибрации инструмента;  $V_1$  и  $V_2$  – направления движения инструмента

Во всех отмеченных на рис. 5 случаях формоизменения заготовки на клин изначально в сечении прямоугольной формы происходили по одинаковой схеме – с вогнутостью на продеформированном торце (рис. 3).

#### ВЫВОД

Моделирование процесса осадки с наложением ультразвуковых колебаний на образцах из пластилиновой многослойной заготовки позволяет установить характер течения металла и при ультразвуковой ковке заготовок из вязкопластичных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Асташев, В. К. Возбуждение и стабилизация резонансных колебаний ультразвуковых стержневых систем / В. К. Асташев, М. Е. Герц // Акустический журнал. – 1976. – Т. 22, № 2. – С. 192–200.
2. Смирнов-Аляев, Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов-Аляев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
3. Харитонович, М. В. Ультразвук в процессах пластической деформации металлов и сплавов: обзор отечественной и зарубежной литературы 1955–1969 гг. / М. В. Харитонович, Г. И. Эскин. – ВИЛС, 1970. – 112 с.

4. Северденко, В. П. Ультразвук и пластичность / В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1976. – 446 с.

5. Северденко, В. П. Обработка металлов давлением с ультразвуком / В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 288 с.

6. Langenecker, V. Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals / V. Langenecker // IEEE Transact. Sonics and Ultrasonics. – 1966. – V. SU-13, № 1. – P. 1–8.

7. Асташев, В. К. О влиянии высокочастотной вибрации на процессы пластической деформации / В. К. Асташев // Машиноведение. – 1983. – № 2. – С. 3–11.

8. Красовский, А. А. О вибрационном способе линеаризации некоторых нелинейных систем / А. А. Красовский // Автоматика и телемеханика. – 1948. – Т. 9, № 1. – С. 20–29.

9. Блехман, И. И. Метод прямого разделения движений в задачах о действии вибрации на нелинейные механические системы / И. И. Блехман // Изв. АН СССР. – 1976. – № 6. – С. 13–27.

10. Вибрации в технике: справ. – Т. 2: Колебания нелинейных механических систем. – М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.

Поступила 10.04.2006

УДК 621.793

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕКАМЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Докт. хим. наук **ПЕРЦОВСКИЙ А. Л.**

ГУ «Республиканский научно-практический центр гигиены»

Докт. техн. наук, проф. **ИВАЩЕНКО С. А., асп. ГОЛУШКО В. М.**

Белорусский национальный технический университет

Вакуумно-плазменные технологии формирования покрытий являются одними из прогрессивных, динамично развивающихся направлений по созданию поверхностных слоев изделий с особыми функциональными свойствами. Качество и эксплуатационные характеристики вакуумно-плазменных покрытий определяются состоянием исходной поверхности, материалом и технологией нанесения нанослоев покрытия. В свою очередь, технологический процесс нанесения покрытий в определенной

степени зависит от материала и физико-механических свойств основы.

Исходная поверхность изделий для нанесения вакуумно-плазменных покрытий формируется в процессе предварительной внекамерной и окончательной внутрикамерной обработки. Для вакуумно-плазменных методов нанесения покрытий главная цель предварительной обработки – это удаление загрязнений, т. е. очистка поверхности основы. Наличие загрязнений на поверхности при вакуумизации приводит к на-