

В.К. Борисевич¹, В.В. Драгобецкий², О.В. Троцко²

*¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

*²Кременчугский государственный политехнический университет
имени М. Остроградского, Украина*

МНОГОФАКТОРНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ВЗРЫВНОЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

В статье изложены и частично количественно обоснованы новые направления в обработке металлов взрывом. Предпочтение отдается рассмотрению физических явлений на микро- и наноровнях для создания компактных сред.

фазовое превращение, пластическая деформация, импульсное воздействие, тензор, ударная волна, взрывчатое вещество, диффузия

При взрывном нагружении в материале заготовки возникают возмущения различной природы, приводящие к фазовым превращениям; необратимым пластическим деформациям; обратимому увеличению объема материала под действием теплоты, выделяемой при ударном сжатии; образованию соединений и разрушений. При различных схемах импульсного воздействия может быть достигнуто заданное формообразование, упрочнение, соединение, компактирование, дробление и нарушение сплошности. Характер и интенсивность импульсного воздействия на заготовку даже в одном процессе могут существенно различаться и открывают возможности для изменения геометрических, механических, физических и др. свойств. Возмущения, распространяющиеся с определенными конечными скоростями в виде волн напряжений (нагрузки, разгрузки, а также отраженных), образуют в заготовке области возмущений, которые с течением времени расширяются. Каждой области возмущений соответствует напряженно-деформированное состояние, характеризующееся тензором напряжений и тензором деформаций и определяемое природой возмущения.

Высокие энергетические параметры и импульсный характер взрывного нагружения в своем элементарном приложении чрезвычайно многогранен

и многообразен, и не все его аспекты изучены. В процессах гидровзрывной штамповки помимо необходимого формоизменения достигается значительное упрочнение обрабатываемой заготовки, а в ряде случаев происходит и сварка обрабатываемой заготовки с матрицей. Процесс сварки взрывом также сопровождается упрочнением, пластической деформацией и формоизменением. В процессе взрывного прессования помимо сварки трением, возникающей при адиабатических сдвигах частиц и их жидкофазного спекания, происходят и микропроцессы сварки взрывом частиц.

При прохождении фронта ударной волны через частицу шихты, происходит ее ускорение до определенной скорости, затем она соударяется с другой частицей, и вполне вероятно образование косоугольного соединения. Образование струи происходит в результате столкновения двух поверхностей под углом 2β со скоростью V_k . Вылетающая струя пробивает отверстие в соседней частице с образованием зоны плавления в месте торможения струи.

Прохождение ударных волн в элементарном процессе взрывной обработки приводит: к скачкообразному изменению параметров состояния и движения среды; возрастанию энтропии среды; перемещению частиц среды в направлении фронта волны и т.д.

Таким образом, для описания элементарного процесса взрывной обработки необходимо учитывать факторы, связанные с деформацией, нагревом и фазовыми превращениями.

При выборе и обосновании процессов обработки для конкретных условий производства, возможно, следует считать тот процесс, который при прочих равных условиях обеспечивает наименьшие затраты энергии, необходимой для получения заданных физико-механических свойств изделия. Процесс получения изделий с требуемыми эксплуатационными свойствами следует считать энергетически оптимальным процессом.

Однако в ряде случаев процессы взрывной обработки позволяют получать изделия с уникальными свойствами, недостижимыми другими методами обработки. Кроме того, при состоянии уровня техники на данном этапе развития энергетическую оптимизацию нельзя смешивать с технологически оптимальным процессом, под которым понимают процесс, обеспечивающий минимальные суммарные трудозатраты T_{Σ} .

Для перехода от элементарных процессов взрывной металлообработки к распространению реальных и выявлению принципиально новых необходимо перейти к рассмотрению процессов, использующих высокоэнергетические источники энергии.

В последние годы интерес проявляют к методу быстрой кристаллизации, суть которого заключается в охлаждении расплавленного металла со скоростью порядка одного миллиона градусов в секунду. Быстро охлажденные сплавы сравнительно гомогенны, поскольку для образования и роста больших зерен не хватает времени. Материалы с гомогенной структурой прочны и имеют высокие температуры плавления. Быстрая кристаллизация может вызывать образование метастабильных фаз: кристаллических аморфных, менее устойчивых фаз, образующихся при медленном охлаждении. Метастабильные фазы обладают рядом нетривиальных свойств. Например, быстрокристаллизующиеся алюминиевые сплавы имеют удельную прочность, равную или превышающую прочность титановых сплавов при умеренных и высоких температурах. Они также необычайно коррозионностойки. Быстроохлажденные алюминиевые сплавы способны заменить титан в деталях компрессоров газотурбинных двигателей, чугуны в тормозных дисках автомобильных колес, чугунные корпуса букс железнодорожных вагонов и т.д.

Существуют следующие методы получения быстроохлажденных сплавов. Простейший из них – сверхтвердая закалка, при которой капли расплавленного металла выбрасываются на охлаждающую поверхность. Другой метод – распыление, когда мелкораспыленные капли охлаждаются инертным газом. Фирма Prant and Whitney разработала установку, в которой тонкая струя расплава падает на быстровращающийся диск, разбивающий ее на капли, и выбрасывающий их в холодную атмосферу. С помощью этого метода получают мелкодисперсные порошки быстроохлажденного сплава, которые затем спрессовываются путем горячего прессования. General Electric Company объединила плавление, прессование и формовку в единый процесс, в котором с помощью плазменного факела быстроохлажденный сплав используется в качестве тонкого покрытия деталей. Осажденный сплав хорошо противостоит термической усталости.

В одном из наиболее универсальных методов быстрого охлаждения используются лазеры с высокой плотностью энергии. С помощью этого метода достигают скорости охлаждения более десяти миллионов градусов в секунду. Основное преимущество метода в том, что микроструктура поверхности металла может быть изменена без воздействия на объемную часть. Можно получать и более толстые слои быстрозакаленного металла, выращивая их путем непрерывного нанесения на поверхность легированного порошка с одновременным воздействием на него лазером. Манипулируя лазерным лучом, можно получать достаточно сложные конфигурации.

Сделана попытка осуществления динамической закалки для получения дроби, быстрозакаленного металла путем метания порошка и пластин металлов зарядом взрывчатого вещества на охлаждаемую медную поверхность, омываемую жидкостью, жидким азотом и пр.

Процесс образования метастабильных фаз можно осуществить по следующей схеме: в полости, образованной в высокопрочном сплаве, располагается взрывчатое вещество и метаемое тело. При взрыве заряда метаемая среда разгоняется, и при соударении с охлаждаемой поверхностью тормозится, при этом происходят процессы, характерные для быстрой кристаллизации.

Максимальное давление, возникающее при соударении метаемой среды с твердой поверхностью, можно оценить по формуле

$$p = \rho_o C_o v \left(1 + k \frac{v}{C_o} \right), \quad (1)$$

где ρ_o , C_o – плотность метаемой среды и скорость звука в ней;

v – скорость частиц метаемой среды;

k – постоянная, характеризующая увеличение скорости волны при ударном сжатии.

Давление, необходимое для образования метастабильной фазы, соответствует сотням килобар и достижимо при скоростях соударения, превышающих в несколько раз скорость звука в воздухе. Достигнуть этого можно при использовании импульсных источников энергии. Скорость метаемого тела V_1 составит

$$V_1 = D = \left[\frac{3r}{(k^2 - 1)(3 + r)} \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где k – показатель продуктов взрыва; D – скорость детонации; $r = \frac{\rho_o \delta_o}{\rho_1 \delta_1}$; ρ_o, ρ_1 – плотности взрывчатого вещества и метаемого тела; δ_o, δ_1 – протяжности взрывчатого вещества и метаемого тела.

В зависимости от вида взрывчатого вещества и соотношения масс взрывчатого вещества и метаемого тела скорость V_1 достигает 2500 м/с.

Скорость падения температуры при соударении метаемого тела с поверхностью другого материала при скоростях соударения порядка 1000 м/с в интервале температур 700 – 350 °С составляет до 3,5·10⁶ °С. При таких градиентах температур происходит получение аморфных материалов из расплавов. Такие параметры соударения характерны для процессов сварки взрывом, и ряд исследователей, изучающих структуры зоны соединения сваренных взрывом заготовок, обнаружили в сварном шве включения аморфного металла. На некоторых режимах сварки взрывом в зонах, прилегающих к сварному шву, образуются литые включения. Последние снижают качество и прочность сварного соединения и крайне нежелательны. Для образования слоя из аморфного материала или слоя, обладающего большим количеством аморфных составляющих, режимы соударения должны обеспечить расплавление приконтактных слоев и высокую скорость охлаждения. Количество литых включений увеличивается по мере увеличения скорости детонации D , а, следовательно, и скорости точки контакта. Структура зоны соударения должна быть волнообразной. При соударении без волнообразования литые включения не образуются. Поэтому предельное значение скорости точки контакта должно лежать в пределах зоны волнообразования. Величина сварочного зазора h и параметр сварки r должны соответствовать максимальной скорости соударения. Как правило, при таких режимах сварка не происходит, а образуется псевдоаморфный слой, обладающий рядом уникальных свойств. Таким образом, на стыке процессов сварки взрывом и взрывного упрочнения для ряда материалов возможен процесс быстрой кристаллизации. И этот процесс, вероятно, дает возможность получения монометаллов с поверхност-

ной структурой и свойствами, характерными для биметаллов. Интенсифицировать и стабилизировать процесс нанесения покрытий с псевдоаморфной структурой возможно путем придания упрочняемой поверхности подложки рельефа - треугольного, трапецеидального и др. профилей. При соударении струй образуется мелкодисперсная пелена и распыление струй на массивное тело подложки. В таких условиях скорость охлаждения компонент кумулятивных струй достигает 1 млн. градусов в секунду, и создаются условия для быстрой кристаллизации.

В процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) вопрос фиксации промежуточных продуктов при протекании многостадийных реакций в волне СВС решается при скоростях охлаждения $10^4 - 10^5$ К/с, близких к скоростям высокоскоростной закалки. В этих условиях происходит получение метастабильных структур и состояний вещества с особыми свойствами. Необходимую скорость охлаждения можно обеспечить при использовании высокоскоростной струи воды, направленной перпендикулярно фронту волны синтеза.

Методы взрывной обработки открывают новые возможности в области получения тонких покрытий толщиной порядка 10^{-6} м.

Покрытия, полученные в процессе совместной пластической деформации при сварке взрывом, по своей прочности сцепления с подложкой превосходят все существующие методы плакирования. Это дает возможность использовать полученные таким образом детали с защитными покрытиями в условиях динамического нагружения. Кроме того, покрытия обладают коррозионной стойкостью, антифрикционностью, гидростойкостью, теплопроводностью, износостойкостью.

Определенные трудности возникают при нанесении покрытий толщиной менее одного мм. В этом случае происходит деформация, коробление, разрывы и т.д. плакирующего слоя, но и что особенно существенно, потребный заряд взрывчатого вещества по своей геометрии меньше критического диаметра детонации. Для решения проблемы сварки используют дополнительные пластины – спутники, к которым приклеивают фольгу из плакирующего материала. Как правило, после сварки из-за наличия волн растяжения происходит отрыв пластины спутника. Качество плакирующего слоя определяется технологией склеивания. Кроме склеивания покры-

тие на пластину – спутник можно наносить любым другим методом напыления, химическим и т.д. При соударении с подложкой происходит перенос материала покрытия на последнюю. Прочность сцепления при этом превосходит исходную с пластиной – спутником.

Следующим направлением формирования тонких металлических покрытий является сварка взрывом порошков с монолитными металлами.

Для нанесения порошков на металлы ударными волнами применяют схемы, аналогичные одностороннему прессованию. Процесс метания пористого (или сыпучего) слоя, как правило, при теоретическом анализе разбивают на два этапа. На первом этапе разгон происходит в ударной волне, сильно уплотняющей вещество, переводя его в близкое к компактному состоянию. На втором этапе продукты детонации далее ускоряют спрессованный пористый слой. Между взрывчатым веществом и порошком используют защитный слой. Нанесение порошковых покрытий на металлической основе ударно-волновой обработкой производится как в твердом, так и жидком состоянии. Смена механизма формирования слоев от твердого к жидкофазному определяется значениями скорости соударения порошка с подложкой и скоростью скольжения ударной волны вдоль подложки. Для процесса в твердой фазе слой покрытия состоит из спрессованных, деформированных и сваренных между собой частиц исходного порошка, а прочность его сцепления близка к прочности монолита. Соударение порошка со скоростью, превышающей критическую, приводит к образованию слоев из жидкой фазы с формированием литых структур и прочностью сцепления на уровне монолита. Толщина слоев может достигать 200 – 300 мкм.

Монолитная металлическая подложка при импульсной обработке остается холодной. Жидкофазное формирование поверхностных слоев можно рассматривать как динамическую закалку из жидкого состояния. Данному методу присущ ряд особенностей: плавление порошкового материала происходит с высокой скоростью нагрева, что позволяет избежать выгорания и окисления элементов при обработке высоколегированных и порошковых смесей; высокая скорость физико-химических реакций в ударном фронте позволяет получать слои из метастабильных фаз или пересыщенных растворов и соединений из смесей порошков непосредственно за

время обработки; перевод металла порошка в расплавленное состояние и его охлаждение со скоростью порядка 1 млн. градусов в секунду создает условия для быстрой кристаллизации.

В процессе сварки взрывом на режимах $r < r_{\min}$ и $r > r_{\max}$ (r – параметр сварки) соединения свариваемых материалов не происходит, но, тем не менее, на соударяющихся поверхностях образуется тонкий металлический слой. При $r < r_{\min}$ основной механизм образования покрытия связан с фрикционным взаимодействием соударяющихся поверхностей, а при $r > r_{\max}$, когда давления в зоне контакта превышают $2\sigma_m$ (σ_m – предел текучести), наблюдается множественный откол от соударяемой поверхности метаемой пластины. В результате этого происходит соударение и сварка отколовшихся частиц металла с поверхностью подложки, затем дополнительное зачеканивание откольных частиц в поверхность ударом плакирующей пластины и отскок последней.

Соединение не происходит и в том случае, когда полученное соединение разрушается волнами разгрузки вследствие того, что в процессе деформации металла в зоне соединения большое количество энергии переходит в тепло, и наиболее деформированные поверхности участка расплавляются, а затем затвердевают при отводе тепла в окружающий слой металла. При движении точки контакта зона высоких давлений сменяется зоной растягивающих напряжений. Когда расплавленный участок металла не успевает затвердеть, происходит разрушение зоны соединения. Зона перемешивания расплавленных при соударении металлов остается на одной из поверхностей.

Стабильное получение покрытий толщиной 200÷300 мкм наиболее целесообразно осуществлять при $r < r_{\min}$ и активации фрикционного взаимодействия. Это достигается путем обеспечения скольжения плакирующего слоя по подложке. Для этого размещают заряд на торцевой поверхности плакирующей заготовки, либо плакирующую заготовку выполняют в виде клина.

Разработана установка для фрикционного нанесения покрытий с совмещением операций динамической закалки.

Технологический процесс включает подготовку поверхности и собственно фрикционное покрытие.

Удобно в технологическом отношении наносить покрытие, используя клеевые составы. На пластину-спутник наносится клей, например, силикатный или жидкое стекло. На клей наносится плакирующий слой порошка необходимого состава. При соударении с плакируемой поверхностью слой порошка переносится на последнюю. Затвердевший клей отлетает.

Ряд заготовок после взрывного нагружения подвергаются цементации. Глубина упрочненного слоя в обработанных взрывом деталях и заготовках за одинаковые интервалы времени увеличивается в 2 – 5 раз по сравнению с необработанными. Поэтому одним из направлений может быть изучение влияния предварительного импульсного нагружения на диффузионные процессы.

Так как диффузия совершается путем последовательного перемещения отдельных атомов, то для движения любого данного атома в твердом теле обязательно приобретение им определенной энергии активации. Установлено, что всякий фактор, способствующий увеличению исходной энергии атома, тем самым способствует уменьшению той дополнительной энергии, которая необходима для активации атома при диффузии. Наличие избыточной потенциальной энергии в кристалле с искаженной решеткой приводит к увеличению вероятности активации атомов, находящихся в областях с неправильной структурой, повышая тем самым скорость диффузии, которая обычно значительно быстрее протекает по искаженным областям границ зерен, имеющим энергию, выше, чем в объеме кристаллов, характеризующемся более совершенной структурой.

Основные параметры процесса диффузии связаны первым и вторым уравнениями Фика. Факторами ескорения диффузии могут быть градиент температуры, градиент напряжений, градиент электрического поля и т.д. Уравнение диффузии запишется в виде:

$$\frac{D\partial M}{\partial T} = -\frac{D_c\partial C}{\partial x} \pm \frac{D_m\partial T}{\partial x} \pm \frac{D_\sigma\partial\sigma}{\partial x} \pm \frac{D_E\partial E}{\partial x} \pm \dots, \quad (3)$$

где D_C , D_T , D_σ , D_E , D – коэффициенты диффузии, обусловленные соответственно градиентом концентрации, температуры, напряжения, электрического поля; m – масса диффундируемого вещества.

$\partial C, \partial T, \partial\sigma, \partial E$ – градиенты концентрации, температуры, напряжений и электрического поля;

$\frac{D\partial M}{\partial T}$ – скорость переноса массы диффундируемого вещества.

В нашем исследовании наибольший интерес представляет градиент напряжений $\frac{\partial \sigma}{\partial x}$ и температуры $\frac{\partial T}{\partial x}$. При прохождении ударных волн через металлы градиент напряжения составляет величину порядка сотен тысяч атмосфер на несколько микронов, и очевидно, что в этом случае роль D_{σ} значительно возрастает, прохождение ударной волны неизбежно связано с повышением температуры, изменением дефектности кристаллической структуры и т. п.

Существенное влияние на самодиффузии оказывает скорость деформации. Увеличение скорости деформации от 10^{-4} до $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ при температуре $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению коэффициента в 2500 раз. Полученные значения D для самодиффузии превосходят коэффициент диффузии железа в жидком состоянии. В диапазоне скоростей деформаций от 10^{-2} до 10^{-3} с^{-1} также отмечается увеличение коэффициента диффузии, связываемое с повышением средней концентрации вакансий, число которых оценивают с привлечением зависимости

$$N = \frac{kl_p}{2bd} \quad (4)$$

где $k=0,25$ – фактор, учитывающий долю образовавшихся порогов дислокаций, которые могут перемещаться конвективно;

l_p – расстояние, на которое перемещается каждая дислокация;

b – вектор Бюргера;

d – расстояние между дислокационными диполями.

Следовательно, одной из областей применения взрывной обработки может стать модифицирующее воздействие ударных волн и скоростной деформации на материал, который в дальнейшем будет подвергнут химико-термической и дрeубv видам обработки. После взрывного нагружения большинство металлов переходят в активированное состояние, и ряд процессов химико-термической обработки и нанесения защитных покрытий (цементация, борирование и др.) протекает значительно быстрее при тех же показателях качества.

Взаимодействие падающей и отраженной ударных волн в нагружаемом материале приводит к возникновению нарастающих растягивающих напряжений, которые могут привести к разрушению, называемому отколом. На это явление больше всего влияют форма волны напряжения и предельное значение разрушающего напряжения σ_v нагружаемого материала. Положение трещины откола в сплошном материале или места расслоения в слоистом зависит от формы волны напряжений. При распространении волны в материале крутизна кривой $\sigma(t)$ за фронтом волны уменьшается с увеличением толщины нагружаемого поли- или мономатериала δ , что приводит к увеличению толщины откола Δ . При распространении волны напряжений большой интенсивности $\sigma > 2\sigma_v$ возникает множественный откол – несколько следующих один за другим параллельных отколов.

Обычно для предотвращения откола отражающую поверхность материала непосредственно опирают о другое тело, поглощающее энергию. Предотвращение откола производится и путем использования захватывающих плит и мастик. При этом откольные элементы, поглощающие значительное количество энергии, могут быть использованы для выполнения ряда вспомогательных операций. Например, в устройстве для штамповки взрывом поворотные грузы, прилегающие к стенкам бассейна, используются во вспомогательных операциях штамповки.

Полезное применение откола – это, прежде всего, разделение слоистых изделий для их утилизации после выполнения своего назначения, а также для расслоения готовых многослойных деталей.

Таким образом, эффект откола находит применение как функциональный и интенсифицирующий фактор и связан с обработкой и созданием слоистых изделий и использованием слоистости, как конструктивного, так и технологического приемов.

Поступила в редакцию 10.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Шаповал, Университет экономики, информационных и системных технологий, Кременчуг.