

никеля в сплаве. Построенные зависимости позволяют вычислить содержание никеля в сплаве Zn-Ni при определенных значениях плотности катодного тока и дозы рентгеновского излучения внутри области планирования. Так, например, расчетное значение содержания никеля в сплаве при плотности тока  $1 \text{ А/дм}^2$  для образца, полученного в условиях облучения рентгеновским излучением мощностью 60 кР/ч, составляет 14,9 ат.%. Экспериментальное значение содержания никеля в сплаве составляет 15,0 ат.%, что коррелирует с расчетным значением.

Таким образом, полученная математическая зависимость позволяет прогнозировать содержание никеля в сплаве Zn-Ni в области планирования и управлять элементным составом покрытий воздействием рентгеновского излучения определенной мощности экспозиционной дозы, не меняя состав электролита.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гамбург, Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю.Д. Гамбург. – М: Янус-К, 1997. – 384 с.
2. Электрокристаллизация Zn-Ni из сульфатных электролитов на индифферентных катодах в поле рентгеновского излучения / Анищик В.М. [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. – №2. – С. 43 – 46.
3. Пикаев, А.К. Современная радиационная химия. Радиолит газы и жидкостей / А.К. Пикаев. – М.: Наука, 1986. – 439 с.
4. Спектры поглощения облученных водных растворов щелочно-галогенидных солей Анищик В.М. [и др.] // Вестник Гродн. гос. ун-та. Сер. 2. Математика. Физика. Техника. Информатика. Биология. Химия. Экология. – 2007. – №1. – С. 1 – 6.
5. Комплексные электролиты в гальванотехнике / Пурин Б.А. [и др.]. – Рига: Лиесма, 1978. – 265 с.

**УДК 621.762**

### **ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**А. А. Андрушевич, С. М. Ушеренко, Н. К. Толочко**

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск*

*Рассмотрены основы импульсной обработки литых материалов для получения повышенных механических свойств, связанных с изменением структуры, приведено обобщение экспериментальных и теоретических результатов по динамическому упрочнению литых деталей машин.*

Традиционные методы получения литых деталей машин с последующим упрочнением пластической деформацией, термической обработкой во многих случаях являются недостаточными для обеспечения заданного комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств [1, 3, 4].

Высокие импульсные нагрузки приводят к реализации ряда необычных физических процессов. Если при статических процессах нагружения флуктуации энергии, давления, нагрева являются исключением, то в условиях динамических воздействий они постоянны. В материале образуются зоны со сложным напряженно-деформационным состоянием и формируются метастабильные структуры и соединения. Импульсное воздействие на металлы энергией взрыва приводит к изменению типа кристаллической структуры за счет динамического фазового перехода [1, 4]. Обнаружен и ряд других явлений, например, локальный разогрев, локальная деформация, наклеп и др. Их сочетание приводит к формированию различных структурных состояний с разными типами структур и, соответственно, комплексами физико-химических свойств [4].

Особый интерес представляют динамические изменения структур, приводящие к изменению свойств литых сплавов, которые определяются особенностями импульсного воздействия – местным разогревом, локальной деформацией, удельной энергоемкостью процесса, его кратковременностью.

Процессы, определяющие литейно-металлургический передел и импульсную обработку заготовок, существенно отличаются друг от друга [5]. После импульсной обработки в металлах и сплавах проявляются эффекты наследственности, которые заключаются в сохранении возникших изменений в структуре и оказывают заметное влияние на механические свойства литых заготовок. Ее особенность состоит в том, что дефекты структуры требуют на образование более высоких значений энергии, чем при статическом нагружении. Плотность структурных дефектов (дислокаций) и твердость при упрочнении взрывом оказываются более высокими, чем при обычных методах обработки металлов давлением. Образование избыточного количества дефектов кристаллической структуры на определенном уровне способствует «динамическому упрочнению» [6]. В этом диапазоне дефектности может быть обеспечено комплексное повышение уровня свойств металлических сплавов, в частности, за счет создания множества плоскостей скольжения в высокотвердых включениях, упрочняющих сплавы, возможен скачкообразный рост пластичности.

Технология динамического упрочнения литейных сплавов в настоящее время практически не реализуется. Анализ литературных ис-

точников и имеющихся экспериментальных результатов показал, что изменение структуры и свойств литых металлов в режиме сверхглубокого проникания (СГП), позволяющем сочетать обработку ударными волнами и локальное легирование, является актуальным. Воздействие пакетов ударных волн на сплавы существенно меняет структуру литого металла на макро-, мезо- и микроуровнях, сложным образом отражается на его свойствах.

Показана возможность динамической перестройки структуры и изменения свойств изделий из литого алюминия и его сплавов (Al-12%Si, Al-12%Si-1%Fe). Качественное отличие импульсного воздействия в режиме СГП от динамического обжата зарядом взрывчатого вещества заключается в возникновении армирующей субструктуры, представляющей собой объемную сетку микрозон перестроенной структуры матричного литого материала. В этих зонах известные материалы приобретают существенно отличный от исходного комплекс физико-химических свойств.

В качестве основного параметра, определяющего упрочнение (повышение твердости), выделяют давление на фронте ударной волны [1, 3]. На поверхности детали наблюдается максимальное повышение твердости, затем резкий спад и медленное убывание. Характер распределения твердости по глубине, по-видимому, зависит от характера изменения давления пакета ударных волн. Пока давление достаточно для протекания динамического фазового перехода, наблюдаются высокие значения твердости, а при снижении давления их величина резко падает.

Установлены структурные изменения в литейном сплаве АК12, происходящие под воздействием импульсного нагружения в режиме СГП. Они заключаются в измельчении структурных составляющих, образовании деформированного поверхностного слоя, возникновении каналов с аморфизированной структурой вокруг них и наличии аморфных волокон, а также в бесструктурном строении поверхностей каналов и прилегающих областей, образовавшихся после прохождения частиц размерами 0,1 – 0,3 мкм.

Расчеты, проведенные по методике работы [7], показали, что при незначительном объеме внесенных дефектов объем измененной структуры сплава составляет 5 – 10 %. В диапазоне времени динамического нагружения могут образовываться новые фазы в приканальных зонах с плотностью, на 50 – 70 % меньшей, чем плотность исходной алюминиево-кремниевой матрицы. Теоретическое значение давления образования этих фаз составляет 1 – 6 ГПа.

Экспериментальные исследования установили, что значения твердости в упрочненных зонах сплава АК12 возрастают на 10 – 20 % на глубине проникания до 110 – 120 мм. Доля матричного материала, затронутого структурной перестройкой, составила 8 – 10 %.

Сопоставление различных схем динамического воздействия по степени влияния на механические свойства литейного сплава АК12 показало, что даже повышенные значения подводимой энергии при взрывной обработке по схеме всестороннего сжатия по сравнению с СГП (более чем в 10 раз) пластичность (относительное удлинение) сплава не увеличивают. При одинаковом изменении значений твердости и прочности импульсная обработка в режиме СГП позволила получить скачкообразное увеличение значения пластичности (в 3 – 5 раз) с уменьшенной на порядок величиной энергии, вводимой в металл. Эти результаты возможны только за счет реализации рассмотренного выше механизма динамической перестройки структуры.

Полученные данные соответствуют представлениям о возможности увеличения дефектности неметаллических высокотвердых армирующих фаз, повышения прочности и, соответственно, скачкообразного увеличения пластичности. При СГП за счет кумуляции энергии в границах раздела фаз процесс дробления (увеличения дефектности) высокотвердых фаз резко усиливается.

Динамическое упрочнение – повышение прочностных характеристик литых деталей, достигаемое при импульсной (взрывной) обработке и связанное с перестройкой структуры литых материалов, существенно зависит от ряда технологических параметров процесса.

Обобщение полученных результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов процессов импульсной обработки литых деталей позволило разработать технологические рекомендации по динамическому упрочнению.

Импульсная обработка приводит к изменению структуры и повышению механических характеристик свойств литых материалов – прочности и твердости на 15 – 40 % при различных схемах нагружения.

Наиболее эффективной является импульсная взрывная обработка в режиме СГП, сочетающая легирование сплава, локальное формирование отдельных зон с образованием аморфизированных структур, и как следствие, образование дисперсионно-упрочненного композиционного материала.

Диапазон импульсных нагружений, при которых происходит динамическая перестройка структуры литейных сплавов на основе алюминия, составляет 2,5 – 17,5 ГПа.

Время нагружения при импульсной обработке может варьироваться в диапазоне 10 – 400 мкс с возможным растяжением для обеспечения более полной перестройки структуры. Такое кратковременное воздействие не приводит к существенному нагреву заготовок и позволяет сохранить полученную структуру.

Для завершения процесса перестройки структуры и получения заданного уровня свойств матричного материала целесообразна комплексная обработка, включающая дополнительно термическую обработку заготовок, например, закалку и отпуск. Длительное тепловое воздействие позволяет управлять получаемыми структурами, а, следовательно, и свойствами литых изделий в требуемых диапазонах.

Импульсная обработка в режиме СГП характеризуется возможностью изменения в широком интервале химического и фракционного состава рабочего вещества, в том числе с использованием наноматериалов, скоростью его перемещения и размещения относительно обрабатываемых заготовок. Это дает возможность управлять изменением структуры как на заданной глубине, так и по сечению литой детали.

Динамическое упрочнение литых материалов, сопровождающееся повышением твердости, особенно поверхностных зон заготовки, отличается высокой производительностью (100 – 120 заготовок/час) и низкими материальными и энергетическими затратами на специальную оснастку и проведение процесса импульсной обработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дерибас, А.А. Физика упрочнения и сварка взрывом / А.А. Дерибас. – Новосибирск: Наука, 1980, 220 с.
2. Деформация металлов взрывом / Крупин [и др.]. – М.: Metallurgia, 197. – 155 с.
3. Ван Флек, Л. Теоретическое и прикладное материаловедение / Л. Ван Флек. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
4. Эпштейн, Г.Н. Строение металлов деформированных взрывом / Г.Н. Эпштейн. – М.: Metallurgia, 1980. – 256 с.
5. Андрушевич, А.А. Управление литой структурой алюминиевых сплавов при импульсной обработке / А.А. Андрушевич // Литейное производство. – 2001. – С. 12 – 14.
6. Ушеренко, С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов / С.М. Ушеренко. – Минск: НИИИП, 1998. – 210 с.
7. Ушеренко, С.М. Современное представление об эффекте сверхглубокого проникания / С.М. Ушеренко // ИФЖ. – 2002. – Т. 75. – № 3. – С. 183 – 198.