

УДК 621.723

## ПРЕДПОСЫЛКИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

д-р техн. наук, проф. Л.М. АКУЛОВИЧ,  
А.В. ЛИННИК, А.М. ЕФИМОВ

(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

*Предложено усовершенствовать процессы магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки введением ультразвуковых колебаний для улучшения качества и производительности. Приведены эффекты, возникающие при воздействии ультразвука на процессы. Рассмотрено и математически описано влияние ультразвукового поля на зарождение зародышей кристаллизации и процесса кристаллизации. Теоретически обосновано положительное влияние ультразвука на процессы магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки, разработаны схемы механизмов подвода ультразвукового поля в эти процессы. Рассмотренные процессы активации в ультразвуковом поле создают условия для межатомного и межмолекулярного взаимодействия металлического расплава и неметаллического твердого тела. В результате проведенного анализа показана возможность управления строением и свойствами формирующегося покрытия путем обработки ультразвуком расплава перед затвердеванием в метастабильном состоянии вблизи области фазового перехода.*

**Введение.** Современные условия функционирования промышленности определяют необходимость досконального знания потребностей рынка, принятия решений, связанных с применением оптимальных технологий изготовления, восстановления и упрочнения деталей машин и оборудования с учетом ограниченной сырьевой базы Республики Беларусь. Разработка и промышленное освоение новых технологий, обеспечивающих высокое качество продукции, повышение производительности труда и эффективности общественного производства – одна из важнейших задач современного машиностроения. В решении данной задачи большое внимание отводится проблеме повышения надежности и долговечности изделий.

В настоящее время при обработке, восстановлении и упрочнении деталей машин или изготовлении новых с необходимым комплексом свойств используются различные методы обработки и наплавки, газотермические методы нанесения покрытий, электрохимические, электронно-лучевые, лазерные, ионно-плазменные и другие. Одним из перспективных путей как интенсификации традиционных методов упрочнения и обработки поверхностей деталей машин, так и создания принципиально новых технологических процессов является широкое использование активирующих факторов: силовых, температурных, химических, магнитных, электрических. Комплексное использование активирующих факторов реализовано в сравнительно недавно предложенных методах упрочняюще-восстанавливающих технологиях – магнитно-электрическом упрочнении (МЭУ) и магнитно-абразивной обработке (МАО).

**Основная часть.** Магнитно-электрическое упрочнение обеспечивает нанесение, термообработку и упрочнение формируемого покрытия в электромагнитном поле. При этом формируются необходимые размеры обрабатываемой детали, физико-механические и эксплуатационные свойства поверхности изделий. Процесс МЭУ обеспечивает формирование тонких слоев защитных покрытий толщиной 0,1 ... 0,6 мм на сторону, а также высокую прочность соединения наплавленного покрытия с основой при минимальном тепловыделении и расплавлении материала основы. С учетом рассмотренных выше достоинств МЭУ очевидно, что метод находит наибольшее применение при восстановлении посадочных мест валов, осей

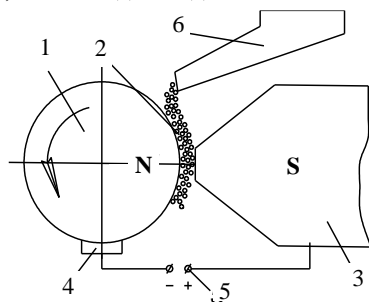


Рис. 1. Схема магнитно-электрического упрочнения:  
1 – обрабатываемая деталь; 2 – ферромагнитный порошок;  
3 – полюсный наконечник; 4 – скользящий контакт;  
5 – источник тока; 6 – бункер-дозатор

и других тел вращения (диаметром от 20 мм и более) под подшипники качения и скольжения, зубчатые колеса, шкивы, шестерни, звездочки и другие детали сельскохозяйственного и автодорожного производства.

Сущность метода МЭУ заключается в следующем [1]. В зазор (рис. 1) между обрабатываемой деталью 1 и полюсным наконечником 3 подается ферромагнитный порошок 2. Частицы порошка выстраиваются в «цепочки». Полюсный наконечник и деталь подключаются к источнику тока. В этот период частицы ферропорошка, которые находятся в контакте с деталью, расплавляются и расплав наносится на поверхность детали.

Это происходит за счёт электрических разрядов между деталью и частицами ферромагнитного упорядоченного порошка.

Известно, что в процессе магнитной обработки (МО) металл, подвергшийся воздействию переменного магнитного поля, изменяет эксплуатационные свойства поверхностного слоя.

Улучшение свойств ферромагнитных деталей при импульсной магнитной обработке объясняется направленной ориентацией свободных электронов вещества во внешнем магнитном поле, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость металла. Эта ориентация происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность металла. При МО вследствие неоднородной кристаллической структуры поверхности в ней возникают вихревые токи. Вихревые токи обуславливают магнитное поле и локальные микровихри, которые в свою очередь нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла. В местах концентрации остаточных напряжений или усталостных напряжений теплота, наведенная вихревыми токами, уменьшает избыточную энергию составляющих кристаллитов и зерен структуры материала, особенно в зоне контакта напряженных участков [2]. Также происходит полярная ориентация спинов электронов атомов, расположенных в области контакта кристаллитов и зерен металла, вследствие чего изменяются его механические свойства.

Указанные явления проявляются и при МАО (рис. 2). Устройство содержит обрабатываемую деталь 1, которая помещается между полюсными наконечниками 3 с зазорами, в которые подаётся порошок 2,

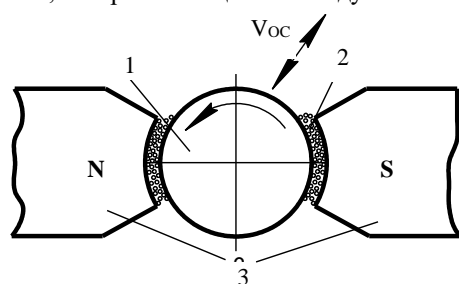


Рис. 2. Схема магнитно-абразивной обработки:

- 1 – обрабатываемая деталь;
- 2 – ферромагнитный порошок;
- 3 – полюсный наконечник

обладающий магнитными и абразивными свойствами [2]. Детали сообщается вращательное движение и осциллирующее движение вдоль горизонтальной оси. Силами магнитного поля зерна порошка удерживаются в рабочих зазорах, прижимаются к поверхности детали, и таким образом производится её обработка. В рабочую зону подаётся смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). В данном случае функции силового источника и упругой связки выполняет энергия магнитного поля. Степень упругости связки регулируется изменением напряжённости магнитного поля, что позволяет рассматривать МАО как процесс шлифования свободно-ориентированным абразивом.

Недостатки процесса МЭУ в том, что не выдерживается нужная сплошность покрытия, имеется пористость

покрытия, неоднородность упрочнённого слоя. При МАО наблюдается низкая производительность обработки заготовки, а также низкая эффективность использования магнитно-абразивного порошка. Для их устранения предложено использовать ввод в рабочую зону ультразвуковых колебаний.

Основные задачи, решаемые в процессе исследований, – теоретическое обоснование устранения недостатков способов и разработка схем подвода ультразвукового поля в процессы МЭУ и МАО. Взаимодействие и воздействие ультразвука на процессы рассмотрим ниже.

Активное воздействие ультразвуковой энергии высокой интенсивности (более  $0,3 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>) вызывает в рабочей среде – жидкостях, газах, твердых материалах – ряд эффектов, на которые в последние десятилетия обращается большое внимание. Особый интерес вызывает возможность использования ультразвука в тех областях технологии, в которых требуется ускорить одни процессы, улучшить качество других.

Во всех технологических процессах, интенсифицируемых под действием ультразвука, используются те или иные из приведенных ниже эффектов, возникающих при активном воздействии интенсивного ультразвукового поля на рабочую (технологическую) среду [3].

**Кавитация.** Большая часть процессов в жидкостях сопровождается явлением ультразвуковой кавитации и возникновением акустических течений. Кавитация приводит к эрозии материалов, а в сочетании с другими эффектами обуславливает реализацию процессов диспергирования, гомогенизации, эмульгирования, интенсифицирует диффузию и ускоряют другие физико-химические процессы.

Кавитация возникает в жидкостях там, где происходит местное понижение давления, следствием чего являются локальные разрывы на расстояниях около тысячных долей миллиметра. В результате этого образуется полость. В следующем полупериоде каверны захлопываются, что вызывает образование ударных волн давлением, достигающим 100 МПа [4].

Захлопывание кавитационных разрывов вызывает образование ударных волн, которые создают в ближайшей зоне давление, превышающее примерно в 100 раз давление первичного акустического поля. При повышенной интенсивности акустического поля можно услышать характерный свист, типичный для момента возникновения кавитации и известный как кавитационный шум. Эти явления особенно заметны

при низкой частоте ультразвука – в области 20 кГц, тогда как при частоте более 1 МГц уловить кавитационный шум трудно [3].

*Акустические течения.* Под акустическими течениями понимают стационарные вихревые микро- и макропотоки жидкости, возникающие в ультразвуковом поле. При колебании воздушного пузырька вблизи поверхности твердого тела создаются характерные микропотоки, воздействующие на технологические процессы в жидкостях [5].

*Механические эффекты.* Высокий уровень знакопеременных напряжений, создаваемых при ультразвуковых колебаниях в твердых телах, может приводить к развитию усталостных явлений и разрушению. Интенсивные колебания двух соприкасающихся поверхностей твердых тел приводят к генерации тепла, создают упругие деформации и вызывают другие эффекты.

*Диффузионные эффекты.* Ультразвуковая энергия интенсифицирует и ускоряет процессы диффузии через стенки клеток, пористые мембраны и фильтры. Интенсивное перемешивание жидкости под действием кавитации и акустических течений приводит к тому, что эффективная толщина пограничного слоя на поверхности раздела «жидкость – твердое тело» уменьшается, а скорость диффузии возрастает [4].

*Капиллярные эффекты.* Эти эффекты способствуют ускорению и более совершенному проникновению жидкостей и жидких металлов в пористые и другие неоднородные материалы.

**Воздействие ультразвука на процессы при МЭУ и МАО.** Сущность способа МЭУ с ультразвуком заключается в следующем (рис. 3) [3; 6]. Наплавляемый слой формируется под воздействием магнитного, электрического и ультразвукового полей. В общем случае смесь ферромагнитного порошка из бункера с помощью подающего устройства поступает в рабочую зону в зазор между наконечником электромагнита и упрочняемой поверхностью.

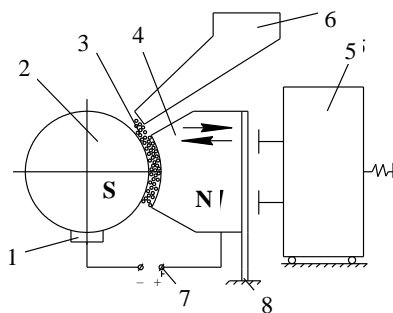


Рис. 3. Схема устройства для получения композиционного покрытия посредством МЭУ с использованием ультразвука:

- 1 – скользящий контакт; 2 – заготовка;
- 3 – ферромагнитный порошок;
- 4 – полюсный наконечник электромагнита;
- 5 – ультразвуковой генератор; 6 – бункер-дозатор;
- 7 – источник тока; 8 – пластинчатая пружина

В образовавшемся гетерогенном твердогазожидкостном расплаве благодаря эффектам второго порядка, имеющим место в жидкофазной системе в мощном ультразвуковом поле, создаются благоприятные межфазные условия для взаимодействия расплава с наплавляемой металлической поверхностью, образования композиционного и синтетического покрытия.

Расплав покрытий представляет собой сложную твердогазожидкостную гетерогенную систему. В рассматриваемых технологических процессах расплав покрытий образуется посредством энергии электрического и магнитного полей, а в качестве интенсификатора физических процессов и явлений в гетерогенной системе используется ультразвуковое поле.

На рисунке 4 показана схема магнитно-абразивной обработки с наложением ультразвуковых колебаний.

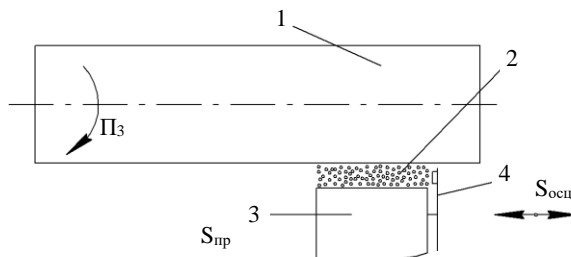


Рис. 4. Схема магнитно-абразивной обработки с наложением ультразвуковых колебаний:  
1 – обрабатываемая деталь; 2 – ферроабразивный порошок;

3 – полюсный наконечник; 4 – пружинная пластина

Схема отличается от приведенной на рисунке 2 тем, что механическим приводом детали сообщается вращательное движение, а осциллирующее движение вдоль горизонтальной оси сообщается абразивному порошку посредством введения в рабочий зазор ультразвуковых колебаний, передаваемых магнитострикционным преобразователем через пружинную пластину 4.

Микрорезание с ультразвуком позволяет за счёт изменения направления, амплитуды и частоты колебаний целенаправленно влиять на глубину царапины, что в свою очередь определяет форму царапины в поперечном сечении [1].

В момент подачи СОЖ при МАО под действием ультразвукового поля в жидкости происходит образование кавитационных пузырьков, которые механически воздействуют на загрязнённую поверхность детали. Это воздействие обусловлено двумя основными причинами: ударной волной, возникающей при захлопывании кавитационных пузырьков, и интенсивными колебаниями незахлопывающихся пузырьков, проникших между плёнкой загрязнения и основной поверхностью детали.

Под влиянием кавитации и связанного с ней действия местных высоких температур и давлений расклинивающий и ультразвуковой капиллярные эффекты играют значительную роль в формировании свойств обрабатываемых деталей. Действия кавитации расклинивающего и ультразвукового капиллярных эффектов приводит не только к заполнению щелевой микрокапиллярной пористой системы твёрдого тела поверхностно-активными веществами СОЖ, но и к разрушению [1].

Рассмотрим влияние ультразвукового поля на зарождение зародышей кристаллизации и процесса кристаллизации.

Вследствие теплового движения атомов и молекул возникают флуктуации. Флуктуация может превратиться в зародыш кристаллизации в том случае, если появится граница раздела с расплавом [7]. Если создадутся условия, при которых атомы, образующие флуктуации, сблизятся, то при этом потенциальная энергия взаимодействия возрастает обратно пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими атомами, образующими флуктуацию [7].

Процесс превращения флуктуации в зародыши кристаллизации и устранение ликвации при затвердевании многокомпонентного расплава можно существенно интенсифицировать за счет воздействия на расплав вблизи температуры затвердевания энергией колебаний в виде мощного ультразвукового поля. Механизм этого процесса состоит в следующем. При распространении колебаний определенной частоты в жидкой системе происходит разрыв сплошностей и в объеме жидкости образуются кавитационные пузырьки, или кавитационная область, представляющая собой систему пузырьков. На образование кавитационного пузырька затрачивается энергия. При исчезновении, захлопывании пузырька запасенная энергия переходит в окружающую среду [8].

В сложном расплаве наряду с флуктуациями плотности возникают флуктуации концентрации [8]. При переходе флуктуации концентрации в зародыши кристаллизации в расплаве, обрабатываемом ультразвуковым полем, возникшие кристаллики уже не будут вытесняться при затвердевании и образовывать ликвации, а будут равномерно распределяться в объеме покрытия. Это обеспечивается кавитационным процессом, микро- и макропотоками, возникающими в ультразвуковом поле. Макро- и микропотоки в ультразвуковом поле способствуют равномерному распределению зародышей кристаллизации в объеме и интенсифицируют рост зародышей за счет подпитки их из маточной фазы. Возникшие зародыши кристаллизации при обработке расплава вблизи температуры затвердевания ультразвуковым полем являются неустойчивыми образованиями. После ультразвуковой обработки количество их может уменьшаться с течением времени, прошедшего после воздействия.

Рассмотрим эти условия и опишем их математически.

Вероятность образования зародышей кристаллизации выражается следующим образом [7]:

$$W = e^{-\frac{F}{kT}},$$

где  $F$  – свободная или поверхностная энергия образования зародыша кристаллизации;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Величина свободной энергии выражается формулой:

$$F = \delta S / 3,$$

где  $\delta$  – свободная поверхностная энергия кристалла, находящегося в контакте с расплавом;  $S$  – поверхность кристалла.

Образовавшиеся зародыши вследствие флуктуации имеют тенденцию к исчезновению до тех пор, пока радиус  $r$  зародыша не достигнет критического размера  $r_{кр}$ .

Критический размер радиуса  $r$  определяем из уравнения Томсона [7]:

$$\frac{T_s - T_r}{T_s} = \frac{2\delta M}{rQ\rho},$$

где  $T_s$  – температура плавления;  $T_r$  – температура плавления зародыша радиуса;  $\delta$  – поверхностная энергия;  $Q$  – теплота кристаллизации;  $\rho$  – плотность твердой фазы;  $M$  – молекулярный вес.

Отделение атомов и молекул от исходной фазы требует известной энергии активации, что тормозит рост зародыша до критического размера. Зависимость коэффициента диффузии от энергии активации и температуры определяет выражение:

$$D = D_0 e^{-\frac{U}{kT}},$$

где  $U$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура по шкале Кельвина;  $D_0$  – коэффициент пропорциональности.

Как можно видеть из приведенной зависимости, чем меньше силы взаимодействия между атомами, тем меньше энергия активации и выше коэффициент диффузии.

Воздействуя мощным ультразвуковым полем на расплав, можно уменьшить энергию активации, а следовательно, увеличить коэффициент диффузии и активизировать процесс зародышеобразования.

Обозначив изменение энергии активации за счет действия мощного ультразвукового поля через  $\Delta U$ , получим для коэффициента диффузии в ультразвуковом поле значение

$$D = D_0 e^{-\frac{U - \Delta U}{kT}}.$$

Изменение под действием ультразвука коэффициента диффузии выражается формулой:

$$\Delta D = D_0 e^{-\frac{U}{kT}} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta U}{kT}} \right).$$

Если учесть это уравнение, относительное изменение коэффициента диффузии под действием ультразвука будет иметь вид:

$$\frac{\Delta D}{D} = \left( 1 - e^{-\frac{\Delta U}{kT}} \right). \quad (1)$$

Из полученного [9] соотношения (1) видно, что относительное изменение физических свойств может служить критерием оценки эффективности влияния внешних условий. С возрастанием энергии ультразвукового поля возрастает относительное изменение коэффициента диффузии, свидетельствующее об интенсификации процесса массопереноса. Уменьшение температуры расплава приводит к увеличению эффективности воздействия ультразвукового поля на расплав.

Рассмотренные процессы в практике ультразвуковой технологии подготовки расплавов материалов к затвердеванию благотворно влияют на механические и эксплуатационные свойства материалов в изделиях машиностроения.

Воздействие ультразвукового поля на расплав вблизи затвердевания должно уменьшить количество как растворенного газа, так и находящегося в свободном состоянии в виде пузырьков. Истинная ультразвуковая дегазация, т.е. выделение растворенного газа и понижение его концентрации в расплаве до значений, меньших равновесного, происходит только за счет диффузии.

Анализ процесса ультразвуковой дегазации расплава в стационарном объеме вблизи температуры затвердевания позволяет сделать вывод о том, что одновременная или последовательная обработка расплава ультразвуковыми колебаниями низкой и высокой частоты существенно интенсифицирует процесс удаления растворенных и свободных газов из расплава.

*Процессы и явления в межфазной границе раздела «расплав покрытия – твердое тело» в ультразвуковом поле.* Рассмотрим случай, когда микроскопическое или макроскопическое металлическое или неметаллическое тело находится в контакте с расплавом и на такую твердожидкостную систему действует мощное ультразвуковое поле. Решение этой задачи представляет интерес для раскрытия механизма

влияния ультразвукового поля на активацию твердых частиц в расплаве на процесс гетерогенного зародышеобразования и взаимодействия на границе «расплав – твердое тело» при наплавке, получении синтетических дисперсных композиционных покрытий и сплавов [3].

В ультразвуковом поле в кавитационном режиме возникают области очень высоких температур и давлений. Установлено, что кавитационный процесс имеет наибольшее развитие у границы раздела «жидкость – твердое тело» [10]. В этом случае на поверхности твердого тела произойдет флуктуационное скопление атомов расплава. Таким образом, ультразвуковое поле интенсифицирует процесс образования зародыша твердого тела на границе раздела «твердое тело – расплав».

Значительную роль в формировании твердого тела должны играть диффузия [11], расклинивающий и ультразвуковой капиллярный эффекты [12] и высокоскоростные кумулятивные струи. Комплексные действия кавитации, расклинивающего и ультразвукового капиллярных эффектов, акустических течений приведут не только к заполнению микрокапиллярно-щелевой пористости системы твердого тела расплавом, но и к разрушению его поверхностного слоя – диспергированию.

Кавитационные полости, образующиеся в различных трещинах, порах и вблизи микрокапиллярно-пористой системы твердого тела, могут иметь несферическую форму [12]. Авторы предполагают [12], что захлопыванием несферической кавитационной полости, так же как и в случае кумулятивного заряда, возможно образование высокоскоростных струй, превосходящих в несколько раз по скорости перемещение границ кавитационной полости.

Границу затвердевания расплава можно уподобить физической модели, представляющей собой систему произвольно ориентированных квазикапилляров различной формы, размеров. Если такая система находится под действием ультразвукового поля, то в квазикапиллярах возникает ультразвуковой капиллярный эффект, приводящий к ускорению движения расплава. За счет движения расплава интенсифицируются процессы массопереноса, связанные с зарождением новой фазы, распределением примесей, положительно сказывающиеся на формирование твердого тела.

От использования рассмотренных процессов на практике можно ожидать улучшение качества соединения материалов при наплавке, упрочнении, металлизации неметаллических материалов, биметаллизации. Эти процессы и явления в гетерогенной твердожидкостной системе «металлический расплав – твердые высокотемпературные металлические и неметаллические частицы» в мощном ультразвуковом поле являются физической основой образования синтетических дисперсных композиционных покрытий и сплавов.

*Формирование строения и свойств твердой фазы при воздействии ультразвукового поля на расплав покрытия.* Расплав материала покрытия вблизи затвердевания представляет собой гетерогенную систему, в которой кроме основного вещества присутствуют различные примеси. Согласно теории гетерогенного зародышеобразования они могут выполнять функцию центров кристаллизации.

В работе [13] указывается что, если размер примеси меньше размера критического зародыша, работа образования устойчивого центра кристаллизации на ней должна подчиняться закону:

$$A = \beta(r_k^2 - r_n^2), \quad (2)$$

где  $r_k$  и  $r_n$  – радиусы критического зародыша и частицы примеси;  $\beta$  – постоянная.

Если  $r_n > r_k$ , образование зародыша на примеси маловероятно; если  $r_n < r_k$ , складываются неблагоприятные условия для возникновения зародыша кристаллизации.

Вследствие воздействия ультразвукового поля на систему с нерастворимыми примесями происходит диспергирование примесей. В зависимости от интенсивности ультразвукового поля и времени обработки размеры дисперсных частиц будут изменяться. При диспергировании они должны пройти барьер, при котором

$$r_n > r_k = 0. \quad (3)$$

Наибольшая эффективность влияния ультразвукового поля на активацию примесей и формирование структуры свойств твердого тела должна иметь место при температуре, близкой к области температур затвердевания расплава.

Действительно, при температурах, значительно превышающих температуру затвердевания, условия для формирования твердого тела существенно ухудшаются, так как система обладает большой свободной энергией по сравнению с условием, близким к термодинамическому равновесию.

Такой вывод подтверждается теоретическим анализом. Скорость роста твердой фазы при кристаллизации вещества определяется известным термодинамическим соотношением [7]:

$$V = B\Delta\Phi, \quad (4)$$

где  $\Delta\Phi = Q\Delta T/T$  – разность термодинамических потенциалов;  $B$  – соответствующий кинетический коэффициент.

Если в температурной точке затвердевания величина разности термодинамических потенциалов фаз равна нулю, то и скорость роста твердой фазы будет равна нулю. Процесс кристаллизации вещества прекращается, устанавливается динамическое равновесие двух фаз – жидкой и твердой. При этой температуре свободные энергии двух фаз равны. Система находится в состоянии устойчивого термодинамического равновесия, обладающего стабильным состоянием. Стабильным состоянием системы можно считать такое, при котором  $F = E - TS$  соответствует минимуму свободной энергии  $F$ . В этом отношении  $E$  – внутренняя энергия, а  $S$  – энтропия.

Ультразвуковая обработка расплава вблизи температуры затвердевания оказывает существенное влияние на изменение характера дефекта в структуре зарождающейся твердой фазы.

Ультразвуковое поле порождает вакансии. Вакансионные петли в свою очередь могут служить источником дислокаций [14].

Диспергирование и активация примесей за счет ультразвуковой кавитации, равномерное распределение зарождающихся кристаллов за счет акустических потоков, изменение межкристаллитных границ, устранение ликвации приводят к изменению макро- и микроструктуры твердого тела, увеличению поверхности границ зерен, к изменению физических, физико-механических свойств твердого тела.

При воздействии ультразвука возможны следующие явления:

- под действием ультразвуковых колебаний в расплавах происходит интенсификация флуктуационных процессов, перехода флуктуации в зародыши кристаллизации и гетерогенного зародышеобразования;

- ультразвуковая обработка многокомпонентных расплавов (за счет эффектов второго порядка, кавитации, мелко и крупномасштабных акустических потоков и т.д.) уменьшает ликвации в твердом теле, приводит к изменению межкристаллитных границ.

Обработка расплава ультразвуком вблизи области фазового перехода первого рода является одним из факторов интенсификации процесса перехода растворенного газа в свободное состояние, а следовательно, полезным условием для дегазации металлов и сплавов.

Активация в ультразвуковом поле взаимодействия расплава при температуре, близкой к затвердеванию, с формирующейся границей твердого тела объясняется:

- увеличением поверхностной энергии на границе «расплав – твердое тело» за счет кавитационного разрушения поверхностных примесей;

- смачиванием поверхности твердого тела расплавом;

- флуктуационным скоплением атомов расплава на поверхности твердого тела и дальнейшей интенсификацией процесса зародышеобразования;

- капиллярным, звукокапиллярным, расклинивающим эффектами, высокоскоростными кумулятивными струями;

- интенсификацией диффузионных процессов;

- мелкомасштабными акустическими потоками.

**Заключение.** Рассмотренные процессы активации в ультразвуковом поле создают условия для межатомного и межмолекулярного взаимодействия металлического расплава и неметаллического твердого тела.

В результате проведенного анализа показана возможность управления строением и свойствами формирующегося покрытия путем обработки ультразвуком расплавов перед затвердеванием в метастабильном состоянии вблизи области фазового перехода.

Теоретически обосновано положительное влияние ультразвука на процессы магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки, разработаны схемы механизмов подвода ультразвукового поля в эти процессы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акулович, Л.М. Исследование процесса упрочнения деталей машин в магнитном поле: дис. ... канд. техн. наук / Л. М. Акулович; ФТИ АН БССР. – Минск, 1978. – 181 с.
2. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 172 с.

3. Шиляев, А.С. Ультразвук в науке, технике и технологии / А.С. Шиляев. – Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. – 412 с.
4. Бергман, Л.Ф. Ультразвук и его применение в науке / Л.Ф. Бергман. – М., 1957. – 726 с.
5. Зарембо, И.К. Введение в акустику / И.К. Зарембо. – М.: Физматгиз, 1966. – 519 с.
6. Патент Респ. Беларусь № 3906 / Л.М. Акулович, Л.М. Кожуро, В.И. Гальго, А.С. Шиляев, Н.Ф. Лугаков, Д.Н. Хилько, А.С. Стукин; заявка № а19980370; приоритет 16.04.98.
7. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей / Я.И. Френкель. – М., 1945. – 424 с.
8. Розенберг, Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии / Л.Д. Розенберг. – Минск: Наука, 1970. – 688 с.
9. Шиляев, А.С. Применение ультразвука при восстановлении деталей машин / А.С. Шиляев. – Горки, 1993 – 79 с.
10. Агранат, Б.А. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат. – М., 1974. – 504 с.
11. Кортнев, А.В. Исследование воздействия ультразвука на процессы в гетерофазных системах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.В. Кортнев. – Одесса, 1968. – 21 с.
12. Прохоренко, П.П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко. – Минск, 1981. – 135 с.
13. Михневич, Г.Л. Кинетика кристаллизации переохлажденных органических жидкостей и перенасыщенных растворов: автореф. дис. ... д-ра физ-мат. наук / Г.Л. Михневич. – Минск, 1960. – 24 с.
14. Захаров, М.И. Атомно-кристаллическая структура и свойства металлов и сплавов / М.И. Захаров. – М., 1972. – 217 с.

Поступила 19.05.2011

**BACKGROUND INTENSIFICATION PROCESS OF HARDENING  
AND SURFACE TREATMENT OF PARTS OF MACHINES  
IN THE ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS OF ULTRASOUND**

**L. AKULOVICH, A. LINNIK, A. EFIMOV**

*Proposed to improve the process of magnetic-electric hardening and magnetic-abrasive treatment of the introduction of ultrasonic vibrations to improve the quality and performance. Shows the effects due to the effects of ultrasound on the process. Considered and mathematically described the influence of ultrasonic field on the nucleation of nucleation and crystallization process. Considered and mathematically described the influence of ultrasonic field on the nucleation of nucleation and crystallization process. Theoretically justified positive influence of ultrasound on the process of magneto-electric hardening and magnetic-abrasive treatment and the schemes of arrangements for supplying the ultrasonic field in these processes. Examined the activation process in the ultrasonic field create conditions for the atomic and molecular interaction of the metal melt and non-metallic rigid tela. V result of the analysis shows the ability to control the structure and properties of the coating is formed by sonication of the melt before solidification in a metastable state near the phase transition.*