

УДК 539.4

*И.В. Брякин, д.т.н., профессор*

*Е.И. Дьяченко, аспирант*

*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР*

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ

В настоящей статье рассмотрены особенности реализации процесса волочения металлических технологических объектов. Анализируются основные структурные элементы материала технологического объекта и обосновывается механизм управления параметрами технологического процесса. Предлагается новый метод активизации набора дополнительных физических эффектов в структуре материала технологического объекта с целью формирования в нем необходимых физико-технических свойств, которые в своей совокупности обеспечат оптимизацию соответствующих параметров процесса волочения.

Обосновывается целесообразность применения аппарата синергетики для более детального описания процесса волочения в режиме активации физических эффектов в структуре материала.

**Ключевые слова:** активация, волочение, дефекты, дислокации, домены, деформация, зерна, напряжения, наклеп, процесс, параметры, проволока, пластичность, резонанс, малый параметр, структура, синергетика, физические эффекты, физические поля

### Введение

С давних исторических времен человечеству известен такой способ обработки металлов давлением, как волочение. В наше время этот способ массово применяется для получения большего ассортимента изделий, в частности, проволоки круглого, фасонного и т.п. профилей.

Кроме того, существует множество исследовательских и практических работ, касающихся вопросов волочения, которые лежат в сфере интересов таких наук, как физика твердого тела, механика деформируемого твердого тела, материаловедение и т.д.

Такой широкий и актуализированный интерес к проблемам процесса волочения связан с тем, что во время технологической обработки проволока испытывает на себе воздействие ряда физических полей, например, таких как механическое воздействие, термическое, акустическое, магнитное (эффект обратной магнитоstriction) [1]. Кроме того, волочение приводит к тому, что материал, подвергшийся протягиванию, становится в каком-то смысле композиционным, т.к. при этом имеет сердцевину, менее подвергшуюся наклепу, чем ее периферийная часть. Все упомянутые факторы в своей совокупности указывают на нетривиальность происходящих физических процессов при реализации волочения.

Ввиду того, что сам технологический процесс обработки требует прогнозирования свойств изделий, а также расчета различных технологических параметров, необходима точная, отражающая физику всех происходящих процессов физическая модель, наличие которой позволит выявить механизмы возможной оптимизации самого технологического процесса волочения и повысить его эффективность.

Обрабатываемый материал технологического объекта можно считать активной физической средой, в которой возникающие физические эффекты являются факторами, определяющими основные протекающие в ней процессы и влияющими на параметры физико-технического состояния структуры этого материала.

Традиционно для изменения каких-либо свойств объекта технологического процесса (ОТП) в качестве конкретного воздействия активации используется определенное высокоэнергетическое физическое поле, например, магнитное, электрическое, акустическое и т.д. В результате такого воздействия улучшаются некоторые параметры самого технологического процесса обработки.

«Например, придавая волочиальному инструменту вибрации (колебательные движения), можно в некоторых условиях процесса добиться значительного снижения сил и напряжений волочения по сравнению с процессом без вибрации. Вибрации могут быть осевыми, поперечными и вращательными (крутильными). При этом используемые вибрации имеют как низкочастотные (звуковые 25÷500 Гц), так и высокие (ультразвуковые 16÷800 кГц) колебания. Кроме того, мощность используемых вибраторов должна быть достаточной для обеспечения колебаний волокна без затухания под действием силы волочения. Обычно для получения колебаний низких частот используют мощные вибрационные устройства (0,5÷3,0 кВт) с механическим или гидравлическим приводом» [2].

В качестве другого примера можно привести «способ волочения алюминиевой проволоки, заключающийся в воздействии перед волочением на заготовку импульсным магнитным полем, индукция которого не превышает 0,7 Тл, создаваемым посредством установленного перед волокой индуктора, на который подают импульсы тока с амплитудой от 2 до 30 кА и частотой от 10 до 1000 Гц от источника токовых импульсов» [3].

Для решения указанной задачи предлагается использовать целенаправленное многофакторное резонансное воздействие активации в виде физических полей с малыми параметрами для формирования требуемых свойств структуры материала объекта технологического процесса при его обработке волочением, которое в итоге существенно повлияет на качественные показатели процесса волочения при его реализации.

Для обоснования данной концепции необходимо рассмотреть особенности процесса обработки металлов давлением и провести детальный анализ физических факторов, влияющих на процесс волочения.

### Особенности процесса обработки металлов давлением

Известно, что способность материала получать остаточные деформации без разрушения и сохранять их после снятия нагрузки обуславливается пластичностью материала, которая основана на возможности движения кристаллической решетки [4].

Кристаллическая решетка всех реальных материалов имеет множественные дефекты, которые появляются и движутся практически постоянно. При этом именно эти дефекты позволяют материалам, не разрушаясь, изменять свою форму [5]. В свою очередь материалы с идеальной кристаллической решеткой обладают достаточно высокой прочностью. Практически при любом воздействии на материал его кристаллическая решетка изменяется, меняя свойства материала. Основанный на пластичности технологический процесс получения заготовок или деталей в результате силового воздействия инструмента на обрабатываемый материал фактически представляет собой обработку материалов давлением, которая включает в себя прокатку, прессование, ковку, штамповку, волочение и прочие.

В процессе обработки давлением физико-механические свойства материала достаточно сильно изменяются (рис. 1).

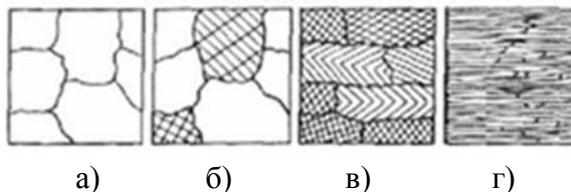


Рисунок 1 – Изменение микроструктуры поликристаллического металла при деформации: а –  $\varepsilon = 0\%$ ; б –  $\varepsilon = 1\%$ ; в –  $\varepsilon = 40\%$ ; г –  $\varepsilon = 90\%$

При деформации поликристаллов деформация зерен начинается сразу по нескольким системам скольжения и сопровождается изгибами и поворотами плоскостей скольжения.

Пока деформация мала, порядка 1%, зерна деформируются неоднородно в силу их разной ориентации по отношению к приложенной нагрузке. С ростом деформации различия в ориентации между зернами уменьшаются, и изменяется микроструктура: зерна постепенно вытягиваются в направлении пластического течения (рис. 1, в). Внутри зерна повышается плотность дефектов. При значительных деформациях образуется волокнистая структура, где границы зерен различаются с трудом (рис. 1, г).

В результате холодного пластического деформирования металл упрочняется, изменяются его физические свойства. Целый спектр параметров, например, таких как предел прочности, предел пластичности, шероховатость поверхности и т.д., изменяется как в одну, так и в обратную сторону [6]. В результате такой обработки материалов часто наблюдается эффект образования наклепа, являющегося упрочнением металлов и сплавов вследствие изменения их структуры и фазового состава в процессе пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации [7].

Наклеп сопровождается выходом на поверхность материала дефектов кристаллической решетки, увеличением прочности и твердости и снижением пластичности, ударной вязкости, сопротивления металлов деформации противоположного знака (эффект Баушингера), что говорит о существенных изменениях в материале, вносимых наклепом.

При деформировании увеличиваются такие прочностные характеристики, как твердость, временное сопротивление  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел упругости  $\sigma_{упр}$ . Кроме того, наблюдаются понижение пластичности и вязкости. Металлы интенсивно наклепываются в начальной стадии деформирования, затем при возрастании деформации механические свойства изменяются незначительно.

С увеличением степени деформации предел текучести  $\sigma_{0,2}$  растет быстрее временного сопротивления  $\sigma_b$ . Обе характеристики у сильно наклепанного металла сравниваются, а удлинение  $\delta$  становится равным нулю. Такое состояние наклепанного металла является предельным, т.е. при попытке продолжить деформирование металл разрушается.

Например, путем наклепа твердость и временное сопротивление  $\sigma_b$  удается повысить в 1,5÷3 раза, а предел текучести  $\sigma_{0,2}$  в 3÷7 раз.

С ростом степени деформации возрастают удельное электрическое сопротивление, коэрцитивная сила, понижаются магнитная проницаемость и плотность металла.

Как указывалось ранее, одним из основных видов обработки материалов давлением является волочение, представляющее собой технологический процесс, при котором длинномерные изделия (заготовки) поперечным сечением в виде круглого или фасонного профиля протягиваются через круглое или фасонное отверстие, сечение которого меньше сечения заготовки (рис. 2).

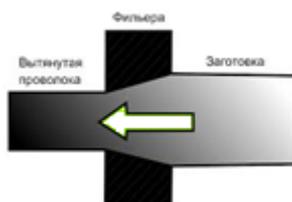


Рисунок 2 – Общая схема процесса волочения

В результате площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а ее длина увеличивается. Волочение происходит в несколько проходов, постепенно уменьшая поперечное сечение заготовки до требуемого. В ходе этого процесса свойства заготовки крайне сильно изменяются.

Непосредственно сама деформация заготовки происходит в фильере, представляющей собой специальный инструмент с сужающимся каналом. Волочение

сопровождается нагревом и достаточно большим давлением в очаге деформации. Обработка производится в несколько итераций с шагом от 0,5 до 0,05 мм. Степень обжатия зависит от величины наклепа металла, что в определенных случаях требует дополнительного отжига материала.

Во время волочения свойства обрабатываемого технологического объекта резко изменяются, что проявляется в росте временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$ , предела текучести  $\sigma_t$ , уменьшении шероховатости поверхности и т.д. [6]

Внутренняя структура заготовки ориентируется вдоль линии действия силы волочения. Наклеп концентрируется на периферии профиля подвергающемуся волочению и постепенно направляется к центру. По мере волочения, с увеличением суммарного обжатия заготовки, рост временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  идет нелинейно. По множественным данным, предел прочности  $\sigma_b$  изменяется по кривой, имеющей рост  $\sigma_b$  в течение первого этапа деформации, ускоряющемся ростом на следующих этапах, и наконец на последнем этапе деформации, при определённой (критической) величине обжатия, чрезвычайно интенсивным ростом  $\sigma_b$ , получившим название сверхнаклеп (рис. 3).

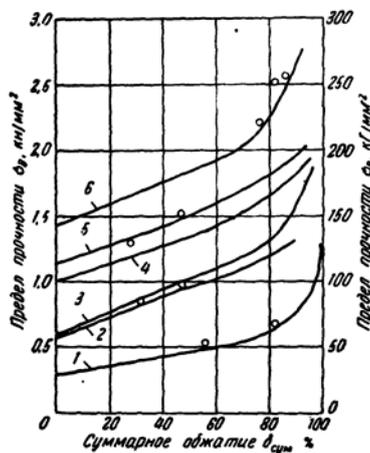


Рисунок 3 – Изменение предела прочности  $\sigma_b$  сталей различных марок и термической обработки: 1 – 0,02% C; 2 – отожжённая 0,9% C; 3 – патинированная 0,3% C; 4 – тоже 0,5% C; 5 – то же 0,7% C; 6 – то же 0,9% C

Для подсчета теоретического  $\sigma_b$  наклепанной стальной проволоки довольно широко используют формулы, предложенные различными авторами. Наибольшее применение нашла формула Потемкина К.Д. [6]:

$$\sigma_s = 10 \left[ \sigma_{вн} + \frac{0,6(C + \frac{d_n}{40} + 0,01\delta_{ед}^{cp})\delta_{сум}}{\lg \sqrt{100 - \delta_{сум}} + 0,0005\delta_{сум}} \right], \quad (1)$$

где:  $\sigma_b$  – предел прочности наклепанной проволоки, н/м<sup>2</sup> (кг/см<sup>2</sup>);  $\sigma_{вн}$  – предел прочности проволоки, подвергаемой волочению (кг/см<sup>2</sup>); C – содержание углерода в стали, %;  $d_n$  – диаметр проволоки, подвергаемой волочению, мм;  $\delta_{ед}^{cp}$  – среднее единичное обжатие проволоки;  $\delta_{сум}$  – суммарное обжатие проволоки.

Данные многочисленных экспериментов показывают, что пластическая деформация поликристаллов металлов и сплавов протекает локализовано на всех этапах волочения, приобретая при этом форму макромасштабного специфического физического процесса, тип которого определяется действующим на соответствующей стадии законом

деформационного упрочнения. В этом случае разномасштабная пространственная локализация является атрибутом деформационных процессов независимо от их природы.

Имеющиеся эмпирические формулы [8] для расчета значения  $\sigma_b$  после волочения с прохождением точки появления сверхнаклепа не дают хорошей сходимости результатов. Требуется либо уточнение имеющихся формул, либо нахождение конкретных зависимостей, учитывающих всю гамму протекающих явлений.

Кроме того, существующая задача точного моделирования технологического процесса волочения с целью последующего анализа результатов его реализации предъявляет высокие требования к соответствующим физическим моделям [9], отражающим соответствующие физические процессы.

Обобщая, можно констатировать, что проблема точного описания происходящих при обработке материалов давлением, а именно при волочении, явлений решена лишь отчасти. Имеющиеся эмпирические формулы не отражают реально происходящих процессов, а позволяют лишь делать приближенные инженерные расчеты. В связи с этим должны быть найдены новые пути для решения данной проблемы. Один из возможных путей решения задачи является рассмотрение происходящих процессов при волочении с позиции синергетики.

### **Анализ физических факторов, влияющих на процесс волочения**

Известно, что фундаментальным принципом самоорганизации служит возникновение нового порядка и усложнение систем через флуктуации состояний их элементов и подсистем. «Благодаря притоку энергии извне и усилению неравновесности отклонения со временем возрастают, накапливаются, вызывают эффект коллективного поведения элементов и подсистем и, в конце концов, приводят к “расшатыванию” прежнего порядка и через относительно кратковременное хаотическое состояние системы приводят либо к разрушению прежней структуры, либо к возникновению нового порядка. Поскольку флуктуации носят случайный характер, то состояние системы после бифуркации обусловлено действием суммы случайных факторов.

Таким образом, самоорганизация, имеющая своим исходом образование через этап хаоса нового порядка или новых структур, может произойти лишь в системах достаточного уровня сложности, обладающих определённым количеством взаимодействующих между собой элементов, имеющих некоторые критические параметры связи и относительно высокие значения вероятностей своих флуктуаций. В противном случае эффекты от синергетического взаимодействия будут недостаточны для появления коллективного поведения элементов системы и тем самым возникновения самоорганизации. Иными словами, недостаточно сложные системы не способны ни к спонтанной адаптации, ни тем более к развитию и при получении извне чрезмерного количества энергии теряют свою структуру и необратимо разрушаются» [10].

Исходя из того, что любой поликристаллический материал имеет сложную структуру и дальний порядок в районе тех или иных структурных несовершенств (дефектов), а процесс волочения изменяет эту структуру и создает дальний порядок во всем сечении, то можно считать, что происходит своего рода процесс самоорганизации.

Поэтому для более полного представления о влиянии воздействий различных физических полей на параметры состояния объекта технологического процесса необходимо исследовать структурные элементы материала объекта, свойства которых лежат в основе синергетических процессов

При этом следует отметить, что реальные кристаллические тела (и тем более поликристаллические) всегда содержат те или иные структурные несовершенства, оказывающие огромное влияние на все структурно чувствительные свойства этих тел.

Рассмотрим основные несовершенства поликристаллических структур по геометрическому признаку:

1. «Точечные дефекты, имеющие размеры, которые в трех измерениях по порядку величины сопоставимы с размером атома. К ним относятся вакансии (дефекты Шоттки), т.е. атомы, находящиеся в междоузлиях; примесные атомы внедрения и замещения, имеющие размер, отличающийся от размера основных атомов, образующих решетку; а также комбинация этих несовершенств» [11].

2. *Линейные дефекты*, имеющие размеры, близкие к атомным в двух измерениях и значительную протяженность в третьем. К этому виду дефектов относятся дислокации, простейшими из которых являются краевые, винтовые и смешанные. Следует отметить, что дислокации легко размножаются и при больших деформациях их плотность может достигать  $\sim 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Дислокации обладают высокой подвижностью, под действием внешних приложенных напряжений способны к направленным перемещениям и вследствие этого вносят основной вклад в пластическую деформацию кристаллических тел.

3. *Поверхностные (или плоские) дефекты*, имеющие значительную протяженность в двух направлениях. К таким дефектам относятся малоугловые границы между субзернами (субграницы), которые повернуты относительно друг друга на малый угол; большеугловые границы зерен; межфазные границы; дефекты упаковки; двойниковые границы; скопление дислокаций в одной плоскости скольжения и некоторые другие комбинации линейных дефектов.

4. *Объемные дефекты*, имеющие значительную протяженность «во всех трех измерениях. К ним можно отнести скопления точечных дефектов типа пор, а также системы дислокаций, распределенных в объеме кристалла. Другими словами, благодаря наличию в кристалле точечных, линейных и плоских дефектов кристаллическая решетка может отклоняться от идеальной структуры в больших объемах кристалла. Кроме того, к объемным дефектам, например в монокристалле, можно отнести кристаллики с иной структурой или ориентацией решетки» [12]. В этом случае в структуре кристалла будут значительные различия между центром дефекта и матрицей, в которой в свою очередь возникнут смещения атомов, убывающих с удалением от ядра дефекта. Поэтому наличие фаз, дисперсных выделений, различных включений, в том числе неметаллических, неравномерность распределения напряжений и деформаций в макрообъемах также можно отнести к объемным дефектам.

Все перечисленные дефекты кристаллической решетки материала вызывают ее искажение и вследствие этого являются источниками внутренних напряжений, что в конечном счете влияет на пластичность и прочность кристаллических материалов в целом.

При этом следует отметить особую роль дислокаций в рассматриваемом технологическом процессе, связанную с тем, «что взаимодействие движущихся к поверхности дислокаций со ступеньками скольжения, которые под нагрузкой действуют как концентраторы напряжений с областью напряжений ближнего порядка, образует в поверхностной области материала слой с повышенной плотностью дислокаций (debris-слой), действующий как барьер, задерживающий дислокации, генерированные в процессе деформации внутренними источниками» [13].

Иными словами, накопленные в объеме материала дислокации сначала испускаются их источниками, а потом тормозятся в результате реакций с другими дислокациями. При этом само размножение дислокаций и их реакции с другими дислокациями являются случайными процессами.

Следует отметить, что даже в том случае, когда к материалу с дислокациями не приложены никакие внешние напряжения, в нем имеются внутренние напряжения, источником которых являются дислокации, большая часть энергии которых связана с упругими деформациями, распространяющимися далеко в объеме внутренней структуры материала.

«Дислокации также косвенно влияют на свойства кристаллов, зависящих от характера распределения и перемещения в них точечных дефектов (примесей, вакансий,

центров окраски и др.). Это связано прежде всего со следующими факторами: 1 – при формировании характера движения дислокация испускает или поглощает вакансии, изменяя их общее количество в структуре материала; 2 – скорость диффузионного перемещения точечных дефектов вдоль оси дислокации, как правило, больше, чем скорость их диффузии через объём регулярного кристалла» [14].

Как известно, для развития пластической деформации необходимо выполнение силовых условий скольжения дислокаций. В случае поликристаллической структуры, кроме распределенных «внутри» зерен препятствий, характеризующихся величиной  $\sigma_0$ , появляется новый вид «барьеров», связанных с границами зерен, для «преодоления» которых необходимо выполнение следующего силового условия деформации:

$$r \geq r_0 + r_i^{(b)},$$

где  $r$  – внешнее приложенное напряжение,  $r_i^{(b)}$  – «сопротивление» границ зерен пластической деформации».

Кроме того, указанная величина может быть представлена в виде суммы дальнедействующего поля  $r_i^L$ , связанного с внесенными в границы зерен дефектами, и короткодействующего «геометрического» сопротивления границ  $r_i^S$ . При этом существенным остается факт того, что границы зерен сами являются источником дислокаций.

Известно, что существуют закономерности влияния размеров зерна поликристаллических материалов на пластические и прочностные характеристики этих материалов. Например, хорошо известна взаимосвязь напряжения течения  $\sigma$  с размером зерна  $d$  в виде соотношения Холла-Петча (ХП):

$$\sigma = \sigma_0 + k \times d^{-1/2}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – предел текучести;  $d$  – размер зерна;  $k$  – коэффициент зернограницного упрочнения, характеризующий вклад границ зерен в упрочнение;  $\sigma_0$  – предел макроупругости.

Следует отметить, что данное соотношение (2) выполняется в широком интервале размера зерна от  $10^{-8}$  м до  $10^{-2}$  м и при различных степенях деформации вплоть до разрушения.

Исходя из соотношения Холла-Петча, можно предположить, что рост  $\sigma$  обусловлен уменьшением размера зерна. Возникающий при этом эффект сверхнаклепа после прохождения определённой точки этой размерности говорит о том, что данная точка является моментом перехода материала технологического объекта из исходного состояния, когда у нее есть две зоны, менее наклепанная сердцевина и более наклепанная периферия, в другое, характеризующееся наличием только одной общей наклепанной зоны. В таком новом состоянии последующий наклеп порождает в материале другие движения дислокаций с уже большей степенью упорядоченности, что приводит уже не к количественным, а к качественным изменениям свойств материала технологического объекта.

Следует добавить, что начало пластической деформации поликристаллических материалов определяется прежде всего напряжением срабатывания источников дислокаций в границах зерен, что говорит о наличии дислокационно-аккумуляционного механизма возможного изменения прочности поликристаллических структур.

«Процесс пластического течения зерен поликристаллических материалов сопровождается непрерывным изменением плотности его структурных факторов, выраженных сложным процессом деформационного упрочнения и разупрочнения, которые обусловлены неустойчивостью дефектной структуры и стремлением системы к минимуму внутренней энергии. Подобные разнонаправленные деформационные процессы в основном обусловлены междислокационными взаимодействиями, но при этом между ними имеется принципиальное различие: для первого вида деформационного процесса

взаимодействия являются атермическим процессом, а для второго – термоактивируемым процессом.

Относительный вклад рассмотренных дефектов кристаллической решетки материала в динамику и кинетику деформации в основном зависит от степени деформации, плотности дефектов, скорости и температуры деформации и др.» [15]. Следует отметить, что в процессе деформации также меняются и размеры самих зерен.

Кроме того, «наблюдаемые изменения величины микротвердости материала в процессе его технологической обработки говорят также о различных по величине барьерах, созданных дефектной структурой. Характеристики приграничных прослоек наряду со структурой самих границ чрезвычайно важны для формирования механических свойств поликристаллических агрегатов, а активное участие границ зерен в пластической деформации связано с прохождением части их сдвига через границы зерен и с организацией скольжения по границам зерен.

При этом преодоление границ зерен сдвигом и распространение части сдвига из одного зерна в соседнее происходят посредством следующих механизмов: 1 – прохождение нескольких дислокаций через границу зерна; 2 – генерация дислокаций с границы зерна под воздействием полей напряжений, возникших в соседнем зерне. В этом случае рассматриваемые процессы в большей мере влияют на пластические свойства, чем на микротвердость».[16]

В случае, если материал объекта является еще и ферромагнетиком, то его можно рассматривать уже в качестве системы с обратной связью, роль которой выполняют главным образом дальнедействующие, следовательно, необменные силы, которые для рассматриваемого случая могут быть магнитными.

При наличии магнитостатической силы, которая относится к магнитным силам, возможно образование доменной структуры, изменяющееся в той или иной степени после каждой ее очередной перестройки. Из этого следует, что перестройка доменной структуры происходит в твердом теле со всеми его дефектами внутреннего строения, т.е. дислокациями, включениями, пустотами, микронапряжениями и т.п.

Таким образом, можно считать, что упругое взаимодействие движущихся доменных границ с дефектами, сопровождающимися в том числе и необратимыми явлениями, например скачками Баркгаузена, а также расход магнитной энергии вызывают соответствующие изменения ориентации и местоположения самих дефектов.

Поэтому одновременно с перестройкой доменной структуры происходит перестройка и дефектной структуры, что сказывается определенным образом при стремлении системы с обратной связью к устойчивому состоянию, т.е. к симметрии динамической петли гистерезиса ферромагнетика. При этом следует отметить существенно разное время перестройки доменной и дефектной структур. Первая, в силу чрезвычайной подвижности доменных границ, фактически «стирается» и воспроизводится в каждом полцикле перемагничивания, а вторая изменяется на протяжении многих циклов, поскольку изменение ориентации и местоположения дефектов подчинено «медленным» законам пластической деформации [17]. Поэтому «повторяемость» актов взаимодействия доменных границ с одними и теми же дислокациями на протяжении сотен и тысяч циклов перемагничивания и является физической предпосылкой для появления возможных изменений состояния пластичности материала технологического объекта.

Обобщая вышесказанное, можно выделить следующие основные элементы структуры материала технологического объекта, состояние которых существенно влияет на параметры технологического процесса обработки материала технологического объекта: 1 – дислокации; 2 – зерна кристаллической структуры; 3 – доменные структуры.

Фактически речь идет об элементах, посредством которых при воздействии на них соответствующих физических полей может быть реализован механизм активации физических эффектов, существенно влияющих на параметры самого технологического

процесса волочения.

Например, известно, что при одновременном воздействии постоянного магнитного поля и «в широком диапазоне частот переменного магнитного поля на металлические материалы прослеживаются различные механизмы бесконтактного преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металла, объединяемые общим понятием электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП). Суть ЭМАП состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитоэлектрическими свойствами, под действием падающей электромагнитной волны возбуждаются ультразвуковые волны той же или кратной частоты. При этом наличие границы раздела сред как места сосредоточения источника возбуждения имеет принципиальное значение».

«Нетривиальность этого преобразования как физического явления определяется рядом обстоятельств: 1 – электромагнитная волна, падающая на границу раздела, возбуждает акустические колебания электрически нейтрального тела; 2 – наличие реальных механизмов, обеспечивающих взаимное преобразование электромагнитных и акустических волн в металлах; 3 – наличие ряда четко проявляющихся физических эффектов, наблюдаемых при изучении чисто акустических свойств (затухания и скорости распространения ультразвука)» [18].

Кроме того, в магнитоупорядоченных средах распространение акустических волн связано с трансформацией волн на доменных границах и возбуждением связанных магнитоупругих колебаний. Для такого процесса необходимо, чтобы упругие колебания  $u(k_n, t)$  сопровождалось колебаниями намагниченности [17]:

$$\Delta M_u(k_n, t) = \lambda \times u(k_n, t), \quad (3)$$

где коэффициент  $\lambda$  зависит от величины магнитоупругого тензора  $\mathbf{b}$ , волнового вектора  $k_n$  и разности частот спиновой и упругой волн.

Магнитоупругий механизм возбуждения и преобразования акустических волн наиболее эффективен при условии, что амплитуда колебаний намагниченности будет превосходить саму намагниченность или хотя бы будет сравнима с ней:

$$\Delta M_u(k_n, t) / M_u(k_n, t) = \eta(k_n, t) \geq 1, \quad (4)$$

где  $\eta$  – магнитоупругий коэффициент усиления колебаний намагниченности.

В отличие от обычных границ раздела сред, доменные границы могут перемещаться по ферромагнетику под внешним управляющим воздействием, которое может быть магнитным или акустическим полем.

В этом случае колебания доменных границ, возбужденные в образце первичной акустической волной, будут сопровождаться возбуждением вторичных акустических волн. Тогда движущуюся доменную границу можно рассматривать как своеобразную волну возмущения (волну параметра), бегущую в покоящейся среде. Сильная подвижность, а также большая нелинейность такой магнитной подсистемы оказывают значительное влияние на физико-механические характеристики этих материалов. Здесь, в отличие от большинства случаев релаксационных явлений в акустике, представляются возможности управления этими характеристиками (временем релаксации и т.д.) с помощью внешних магнитных полей.

Следует отметить, что при этом благодаря возникновению эффекта магнитоэлектрики устанавливаются взаимодействия между элементами доменной и дислокационной структур ферромагнетика, интенсивность которых и будет определять уровень возможного регулирования этих взаимодействий.

Предполагается, что при соответствующем резонансном режиме воздействия на перечисленные выше структурные элементы материала технологического объекта постоянным и переменным магнитными полями на доменной границе возможно возбуждение первичной акустической волны с определенными параметрами, обеспечивающей появление эффектов магнитоупругого взаимодействия и

электромагнитно-акустического преобразования. Подобное одновременное и согласованное возбуждение большого числа дислокационных сегментов и доменных структур за счет воздействия указанных физических полей активации должно существенно повлиять на начальное состояние параметра пластичности материала технологического объекта.

В случае реализации такого многофакторного резонансного воздействия активации, имеющего «многомасштабный» характер, плотность силы, действующей на кристаллическую решетку металла, в первом приближении можно представить в виде трех слагаемых [19]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_{ST} + \mathbf{f}_L + \mathbf{f}_{Def}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{f}_{ST} = \frac{m}{e} \times \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} = -\frac{i \times \omega \times m}{e} \times \mathbf{j}$  – сила Стюарта-Толмена,  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона,  $\omega$  – частота,  $\mathbf{j}$  – плотность тока;  $\mathbf{f}_L = [\mathbf{j} \times \mathbf{H}_0] / c$  – сила Лоренца,  $c$  – скорость света в вакууме, которая проявляется лишь при наличии постоянного подмагничивающего поля  $\mathbf{H}_0$  и зависит от соотношения глубины скин-слоя и длины упругой волны;  $\mathbf{f}_{Def}$  – плотность деформационной силы.

Роль различных компонент силы  $\mathbf{F}$  в процессах электромагнитно-акустического преобразования зависит от многих факторов и параметров задачи (частоты, магнитного поля  $\mathbf{H}_0$ , температуры и др.).

Общей чертой Стюарт-Толменовского и Лоренцова взаимодействий является то, что они оба выражаются через плотность переменного тока, возбуждаемого в скин-слое падающей на границу раздела электромагнитной волной.

В случае возбуждения как продольной, так и поперечной плоских монохроматических акустических волн уравнение вынужденных акустических колебаний, распространяющихся от границы раздела, может быть записано в виде [20]:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - v^2 \times \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho \times c} \times [\mathbf{j} \times \mathbf{H}_{CM}], \quad (6)$$

где  $\mathbf{H}_{CM}$  – векторная величина напряженности постоянного магнитного поля (магнитное поле ПМ);  $\mathbf{j}$  – векторная величина плотности переменного тока в скин-слое;  $\zeta$  – вектор смещения;  $v$  – скорость акустической волны в материале ферритового стрежня;  $\rho$  – удельная плотность материала ферритового стрежня;  $c$  – скорость света.

Полагая, что переменное магнитное поле (поле возбуждения) изменяется по закону  $\exp[i \times (\omega \times t - k \times z)]$ , для плотности переменного тока в скин-слое можем записать:

$$\mathbf{j}(z, t) = \frac{(1+i) \times c}{4\pi\delta} \times H_{1m} \times \exp\left[-(1+i) \times \frac{z}{\delta}\right] \times e^{i\omega t}, \quad (7)$$

где  $H_{1m}$  – амплитуда переменного магнитного поля;  $\delta = c \times \sqrt{2\pi\omega\sigma}$ ,  $\sigma$  – проводимость металла;  $\omega$  – циклическая частота.

На расстояниях, превышающих мощность скин-слоя, и с учетом (6) решение уравнения (7) примет вид:

$$\zeta_m = \frac{H_{CM} \times H_{1m}}{4\pi \times \rho \times v \times \omega} \times \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}, \quad (8)$$

где  $\beta = q^2 \times \delta^2 / 2$ ,  $q = 2\pi / \lambda$ ,  $\lambda$  – длина акустической волны.

Важно подчеркнуть, что указанные явления имеют принципиально динамический характер и представляют значительный интерес для понимания природы пластической деформации твердых тел.

Таким образом, можно с полной уверенностью констатировать, что инициируемое изменение в поликристаллическом материале, как в своеобразной макросистеме, является совокупным следствием изменений ее подсистем и элементов и не определяется простой суммой этих изменений. Иными словами, для рассматриваемого случая подобная макросистема обладает свойством эмерджентности, которое является проявлением, как минимум, трех факторов: 1 – резкое нелинейное усиление ранее малозаметного свойства; 2 – непредсказуемая бифуркация какой-либо подсистемы; 3 – рекомбинация связей между элементами.

### Заключение

Проведенный феноменологический анализ основных факторов, ответственных за особенности пластического течения в приповерхностных слоях материалов при их волочении с позиций учета закономерностей зарождения, размножения и активируемого воздействия физическими полями движения дислокаций вблизи свободной поверхности твердого тела, говорит о том, «что основное изменение механизмов деформации с увеличением среднего размера зерна заключается в переходе от зернограничных эффектов, связанных с перемещением свободного и стесненного объемов; зернограничной диффузии и зернограничного скольжения к дислокационному скольжению в теле зерен с постепенно увеличивающимся вектором Бюргерса от частичных дислокаций к полным» [21].

«При определенном граничном значении размера зерна возможны скачкообразные изменения коэффициентов соотношения Холла-Петча, временного сопротивления, скорости распространения автоволн локализованной пластичности, характера кривой пластического течения, зависимости длины автоволны от размера зерна, а также скорости распространения ультразвука» [22].

Одновременное и согласованное резонансное воздействие постоянного и переменного магнитных полей с малыми параметрами на элементы структуры материала технологического объекта вызывает появление эффектов магнитоупругого взаимодействия и электромагнитно-акустического преобразования, которые в свою очередь вызывают следующие физические процессы: 1 – резонансные кооперативные движения дислокаций и доменных границ; 2 – активизация эволюционирующей перестройки дислокационной и доменных структур в приповерхностных и внутренних слоях материала; 3 – инициация взаимодействия дислокационной и доменных структур с границами зерен; 4 – перевод дислокации в режим «дренажных трубок», по которым точечные дефекты довольно легко могут перемещаться на большие расстояния во всем объеме материала.

Наложение подобного комбинированного воздействия указанными физическими полями на технологический процесс волочения длинномерного металлического объекта позволит изменить его соответствующие физико-технические параметры, например, понизить предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и повысить пластичность материала технологического объекта, что в целом оптимизирует параметры самого технологического процесса.

С полной уверенностью можно констатировать, что характеристики прочности и пластичности материалов являются структурно чувствительными свойствами, в частности, также определяются размером зерна  $d$ . Поэтому обоснованным является предположение о существовании более глубокой синергетической связи между автоволновыми характеристиками локализованного пластического течения и размером зерна при ее активации внешними физическими полями.

Поэтому, используя известный понятийный аппарат синергетики, можно более детально описать смены устоявшегося режима волочения, происходящего в определенной точке (точка бифуркации), после которой изменяется закон роста предела прочности [23]. В этом случае происходит переход от симметрии в границах зерна (рассматриваемое

структурное несовершенство) к симметрии по всему сечению, что в свою очередь является фазовым переходом, а параметром порядка – количество дислокаций в материале.

Следует отметить, что для окончательного обоснования и понимания протекающих процессов в пластически деформированных зернах материала требуется более полная информация о поведении размеров зерна и дефектной структуры в результате совместного резонансного активизирующего воздействия постоянного и переменного магнитных полей с малыми параметрами, которую можно получить при проведении соответствующих дополнительных экспериментальных исследований.

### ***Литература***

1. Миркин Л.И. Физические основы прочности и пластичности. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – 538 с.
2. [http://studopedia.net/9\\_740\\_volochenie-v-voлокah-s-podvizhnimi-kontaktimi-poverhnostyami.html](http://studopedia.net/9_740_volochenie-v-voлокah-s-podvizhnimi-kontaktimi-poverhnostyami.html) (дата обращения: 03.06.22).
3. <http://www.findpatent.ru/patent/249/2497617.html> (дата обращения: 03.06.22).
4. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
5. Гунн Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
6. Юхвец И.А. Волоочильное производство. – М.: Машиностроение, 1987. – 319 с.
7. Калинин Б.А. Физическое материаловедение. – Т. 1. – М.: МИФИ, 2007. – 636 с.
8. Рудской А.И., Лунев В.А., Шаболдо О.П. Волочение. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. – 126 с.
9. Иванов К.М., Лясников А.В., Новиков Л.А., Юргенсон Э.Е. Математическое моделирование процессов обработки давлением. – СПб.: Инвентекс, 1997. – 102 с.
10. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23697127> (дата обращения: 03.06.22).
11. <http://mash-xxl.info/info/329493> (дата обращения: 03.06.22).
12. <https://mash-xxl.info/info/379698> (дата обращения: 03.06.22).
13. <http://dep.nlb.by/jspui/handle/nlb/42297> (дата обращения: 03.06.22).
14. [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=241069](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=241069) (дата обращения: 03.06.22).
15. <http://elibrary.ru/item.asp?id=18758057> (дата обращения: 03.06.22).
16. <http://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=341782> (дата обращения: 03.06.22).
17. Брякин, И.В. К вопросу снижения уровня ложных сигналов в феррозондах // Проблемы автоматизации и управления. – Бишкек: Илим, 2009. – №2. – С.125–133.
18. <http://elibrary.ru/item.asp?id=30480050> (дата обращения: 03.06.22).
19. Шуман В.Н. Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов // Геофизический журнал. – Киев: 2012. – 34, №3 – С. 32–39.
20. Васильев А. Н., Бучельников В. Д., Гуревич С. Ю. Электромагнитное возбуждение звука в металлах. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 339с.
21. <http://elibrary.ru/item.asp?id=16757206> (дата обращения: 03.06.22).
22. <http://elibrary.ru/item.asp?id=17829408> (дата обращения: 03.06.22).
23. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 226 с.