

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

УДК669.01:539.538

Е.И. Дьяченко, аспирант

И.В. Брякин, д.т.н., профессор

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, г. Бишкек

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ МЕТАЛЛА С АКТИВАЦИЕЙ ЭФФЕКТА ВАРИАЦИИ ЕГО ПЛАСТИЧНОСТИ

Рассматриваются различные методы интенсификации пластической деформации во время обработки материалов давлением. Обосновываются вид источника информационного сигнала и условия наблюдаемости инициируемого физического эффекта при проведении исследовательских экспериментов. Анализируются различные аспекты технической реализации испытания методом ползучести и особенности организации исследований на испытательном стенде для волочения проволоки при наличии активизирующих факторов в виде различных физических полей.

Ключевые слова: автоволновые процессы, волочение, дислокации, деформация, датчик, испытательный стенд, информация, магнитопластичность, обработка, пластичность, процесс, синергетика, система, способ, физическое поле, эффект, электропластичность.

Введение

Все известные способы обработки металлов давлением (прокатка, штамповка, волочение и т.д.) базируются на использовании характерного для металлов свойства пластичности, т.е. возможности необратимого деформирования под влиянием приложенных сил [1]. Поэтому вопросы, связанные с исследованиями фактора влияния на свойство пластичности металлов различных физических полей, определенным образом могут быть использованы для обеспечения оптимального режима такого технологического процесса обработки давлением, как волочение.

В различных отраслях промышленности и науки известен достаточно большой набор способов влияния на физические параметры обрабатываемого материала, который основывается как на изменении технологических параметров, параметров заготовки, инструмента, различных смазок и т.д., так и на возможности влиять на сам процесс с помощью различных физических полей, будь то температура, звуковые поля, различные колебательные возмущения, электрический ток, слабые и сильные магнитные поля, радиоактивное излучение [2, 3].

Активнейшим образом промышленность до недавнего времени традиционно использует влияние температуры на пластические свойства металлов. В среднем при температуре 1000°C предел прочности стали снижается более чем в 10 раз относительно предела прочности при комнатной температуре. Температура очень удобный, легкий в использовании, не требующий большого уровня знаний, понятный широкому кругу людей способ изменения физических свойств металлов. Имеется также ряд моментов, негативно характеризующих этот способ интенсификации пластичности металлов. К таким моментам относятся относительно низкий КПД, частые большие потери тепла, иногда плохая экологичность, а также высокий травматизм, связанный с работой с раскалёнными предметами. Часто интенсификация процесса деформации температурой затруднена либо невозможна в принципе, либо является взаимоисключающим фактором какого-либо процесса. Работа с повышенной температурой изделий налагает определенные требования к технологическому оборудованию и инструменту. Кроме того, имеются определенные требования, а также нюансы работы с нагретыми заготовками, например, нужно брать в расчет явление синеломкости. Также негативным моментом является большая инертность процесса, то есть если быстро охладить заготовку в воде еще представляется возможным,

то быстрый, контролируемый нагрев всего предмета либо нужных его частей затруднен [4, 5].

Все эти указанные факторы говорят о необходимости разработки более совершенных методов влияния на процессы пластического деформирования материалов. Подобные разработки требуют проведения соответствующих предварительных исследований, при реализации которых важнейшим фактором является процесс регистрации проявляемых эффектов при различных методах их полевой активации, фактически основанный на свойстве наблюдаемости результатов при таком воздействии.

При этом следует учитывать, что одним из основных вопросов функционирования любой установки для исследований каких-либо физических и технологических процессов, включая и вопрос ее технической реализации, является вопрос выбора вида информационного сигнала и его информативного параметра, в наибольшей степени отражающего свойства проявляемого физического эффекта. При этом проявляемый физический эффект должен быть непосредственно связан с изменениями внутренней структуры объекта технологического процесса и его свойств, вызванных воздействиями соответствующих физических полей (акустических, магнитных, электрических и т.д.).

Обоснование вида источника информационного сигнала

Известно, что синергетика изучает процессы самоорганизации систем, а нелинейная динамика исследует сценарии возникновения порядка из хаоса[6]. С учетом этого сам процесс волочения в целом можно считать синергетическим процессом, обладающим свойством саморегулирования благодаря наличию внутренней обратной связи между совершенно различными по своей природе инициируемыми внутренними физическими процессами, хотя и имеющими общий источник энергии – приложенные механические силы и активизирующие физические поля.

Устойчивость и оптимальное функционирование такого процесса возможно за счет согласованного перераспределения энергии и ее диссипации в соответствующих подсистемах технологического процесса в процессе его реализации. Выявленные механизмы самоорганизации в подобной технологической системе позволяют целенаправленно управлять устойчивостью самого технологического процесса обработки и износом инструмента, обеспечивая повышение точности изготовления различных изделий в процессе их обработки.

Одним из ключевых вопросов различных методов управления технологическими процессами является вопрос наблюдаемости результатов управляющих воздействий, которые проявляются, как правило, в виде набора активизированных физических эффектов. Возможность регистрации с необходимым уровнем определенности активизированных физических эффектов в конечном итоге и определяет реализуемость самого метода управления.

Для обоснования такой возможности представим обрабатываемый материал технологического объекта в виде сложной физической системы, имеющей концептуальную модель с двумя подсистемами: динамической и диссипативной. В этом случае динамическая подсистема моделирует восприятие воздействия внешнего силового физического поля и подачу энергии активации, а диссипативная моделирует преобразовательные возможности активной физической среды. При этом динамическая подсистема имеет конечное число степеней свободы и дискретные энергетические уровни, а диссипативная – бесконечное число степеней свободы и сплошной энергетический спектр. Кроме того, диссипативная подсистема может быть двухуровневой, когда отдельно рассматривается рассеяние энергии в основном активном и в структурных элементах материала технологического объекта.

Подобная интерпретация организации физической системы позволит учесть все возможные изменения состояния физических параметров системы, возникающие в результате энергетических воздействий на ее структурные элементы различных

физических полей и проявляющиеся в виде электрических, магнитных, механических, тепловых, упругих и многих других физических эффектов.

Следует также отметить, что проявляющиеся при этом эффекты нелинейности являются весьма информативными ввиду наличия принципиально нелинейной функциональной связи между активизирующими физическими полями (например, электромагнитным и постоянным магнитным) и откликом активной физической среды, имеющей кристаллическую структуру. В свою очередь эта связь однозначно определяется функцией восприимчивости, отображающей физическое состояние такой активной среды по связям с динамической и диссипативных подсистем, и обеспечивает чувствительность эффектов нелинейности к структурным изменениям в этой среде практически по всем ее пространственно неоднородным распределениям и фактически определяющим ее термодинамическое равновесие.

В связи с этим можно констатировать, что отслеживать все структурные изменения в активной среде можно по эффектам нелинейности, инициируемым воздействием соответствующих физических полей применительно практически к любым физическим системам (с линейными и нелинейными функциональными характеристиками).

При этом анализ процессов в физической системе и в каждой отдельной подсистеме может проводиться на макроскопическом уровне на основе феноменологического подхода, представляющего объекты интегральной функции восприимчивости, которая является носителем информации о возникающих физико-механических процессах. В этом случае феноменологический подход позволяет выделить наиболее общие физические эффекты, определяющие характер измененного физического состояния технологического объекта.

Из феноменологической теории термодинамики необратимых процессов следует, что неравновесные состояния физических систем в целом или их отдельных локальных областей обуславливаются в основном тремя группами инициирующих факторов: 1 – пространственно неоднородные распределения температуры $T(\mathbf{x})$; 2 – конвективные скорости переноса потенциальной энергии $V(\mathbf{x})$; 3 – парциальные химические потенциалы $M(\mathbf{x})$, где \mathbf{x} — пространственный вектор.

Поэтому при исследовании поведения физической системы в процессе технологического воздействия на нее следует особое внимание уделить именно пространственно неоднородным распределениям $T(\cdot)$, $V(\cdot)$, $M(\cdot)$.

При этом причины отклонений указанных распределений от исходных для данного вида технологического объекта фактически являются результатом активации внутренних, скрытых физических эффектов в структуре материала этого объекта, которые в свою очередь в потенциально реализуемом виде формируются в процессе изготовления самого технологического объекта.

Следует отметить, что не все пространственно неоднородные распределения ведут к неравновесным состояниям и вызывают необратимые процессы в изделии. Некоторые их виды создают неравновесные стационарные (устойчивые или метастабильные) состояния. В этом случае параметры, определяющие такое состояние неравновесной системы, не зависят от времени. Исключением являются диссипативные процессы, в которых при переходном процессе изменения состояния параметры физической системы могут зависеть от времени из-за изменения внешнего силового воздействия. Собственно, диссипативный процесс следует рассматривать как необратимый, связанный с односторонним переносом энергии.

В соответствии с универсальным критерием эволюции Глендорфа-Пригожина

$$\partial_x P / \partial t \leq 0 \quad (1)$$

можно утверждать, что в любой неравновесной системе с фиксированными граничными условиями процессы идут таким образом, что скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил, уменьшается [7].

Упорядоченные структуры, возникающие, согласно критерию (1), при необратимых процессах в открытых системах вдали от равновесия в нелинейной области, когда параметры систем превышают определенные критические значения, можно считать диссипативными структурами.

Из первого закона термодинамики (закон сохранения энергии) следует, что ни одна материальная система не может развиваться или функционировать, не потребляя энергии ΔE , которая расходуется на совершение работы A_T , на изменение внутренней энергии системы ΔU и на рассеивание тепла в окружающую среду $Q_{ос}$ [8]:

$$\Delta E = \Delta U + A_T + Q_{ос}. \quad (2)$$

Работа A_T может совершаться в различных формах (механическая, электрическая и т.д.) и расходуется на изменение состояния систем, например, упорядочение структуры и т.д.

В соответствии со вторым законом термодинамики (закон возрастания энтропии) можно утверждать, что реальные изолированные макроскопические системы стремятся самопроизвольно перейти из менее вероятного состояния в более вероятное или из менее упорядоченного в более упорядоченное [8]. Иными словами, самопроизвольные процессы в системах идут в направлении уменьшения свободной энергии:

$$F = U - Q \times S, \quad (3)$$

где Q – тепло; S – энтропия.

Обобщая, можно констатировать, что устойчивым является такое состояние системы, в котором свободная энергия F имеет наименьшее возможное при данных условиях значение. Поэтому наиболее общим механизмом диссипации энергии в динамических системах можно считать различного вида релаксационные явления.

Исходя из этого, отдельные технологические объекты, в определенном смысле, можно считать динамическими системами. Если в равновесном состоянии подсистемы такого технологического объекта-системы, например, при реализации процесса волочения, могут вести себя самостоятельно, то переход в неравновесное состояние устанавливает когерентность, т.е. согласованность их действия, а самоорганизация, захватившая низший уровень объекта-системы, приводит к качественным изменениям его функционирования в целом. В результате самоорганизации деформационных процессов в таких подсистемах сам объект-система приобретает и новые количественные параметры – устойчивое состояние с определенным уровнем, совершая неравновесный фазовый переход с формированием пространственно-временной диссипативной структуры.

От способа активации внутренних физических эффектов зависит значимость проявления иницирующих факторов пространственно неоднородных распределений в физических системах и возможность обеспечения требуемых физических (технических) состояний объекта.

Важнейшим вопросом для рассматриваемой ситуации является обеспечение возможности определения переменных состояний физической системы по результатам измерения физических переменных при соответствующем воздействии активации, т.е. речь фактически ведется о так называемой наблюдаемости объекта.

В этом случае требование наблюдаемости физических переменных объекта обуславливает необходимость выделения таких физических параметров и признаков, которые в полной мере отображают возникающие изменения пространственно-неоднородных распределений.

Очевидно, что для большинства подобных физических систем условия определения переменных состояний выполняется в два этапа: 1 – получение исходной (первичной) информации с объекта в виде сигнала отклика; 2 – обработка исходной информации для определения характера изменения физического (технического) состояния объекта.

Задача первого этапа – выявление отклонений свойств физической системы от исходных по результатам наблюдения за изменениями ее функции восприимчивости, отображаемыми в виде вариаций градиентов физических свойств объекта по видам

восприимчивостей $\chi_l(\cdot)$. Изменения могут быть представлены вариационным множеством наблюдаемых градиентов восприимчивости:

$$\text{Var}\{\text{Grad}_{i,j,k}\chi_l(\cdot)\} \Rightarrow \forall \chi_l(\cdot) \in X, l=1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

где $\chi_l(\cdot)$ – l -я восприимчивость физической среды; X – множество всех видов восприимчивостей, определяемых свойствами физической системы изделия, и подлежащих наблюдению распределениями $T(\cdot)$, $V(\cdot)$, $M(\cdot)$; i, j, k – векторные оси наблюдаемой физической системы.

Практическая реализация наблюдаемости физических систем при диагностировании связана с возможностью проявления и выведения вариации градиентов в сигнале отклика $f(\cdot)$ на воздействие активации, т.е.

$$\text{Var}\{\text{Grad}_{i,j,k}\chi_l(\cdot)\} \Rightarrow f(\cdot), \quad (5)$$

и в отображении наблюдаемых свойств физической системы в некотором множестве параметров и признаков этого сигнала

$$f(\cdot) = \{\prod_{lq}\}; l=1, 2, 3, \dots, \quad (6)$$

где q — число параметров и признаков, используемых для выведения изменчивости l -й восприимчивости физической среды.

Таким образом, общее условие наблюдаемости объекта при технологическом воздействии состоит в отображении отклонений свойств физической системы на некотором множестве информативных параметров и признаков сигнала отклика.

$$\begin{aligned} &\text{Var}\{\text{Grad}_{i,j,k}\chi_l[T(\cdot); V(\cdot); M(\cdot)]\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{\prod_{lq}[T(\cdot); V(\cdot); M(\cdot)]\}; l=1, 2, 3, \dots, ; \forall q \in Q. \end{aligned} \quad (7)$$

Реализация этого условия связана с выбором соответствующего воздействия активации из всего многообразия физических полей в соответствии с используемым физическим эффектом, отображающим распределения $T(\cdot)$; $V(\cdot)$; $M(\cdot)$ в аппаратурно-регистрируемом сигнале отклика.

Задача второго этапа – обработка полученных информационных сигналов отклика на воздействие активации для выделения информативных параметров и признаков, а также определение характера изменения соответствующего физического (технического) состояния объекта из всего множества видов потенциально возможных физических состояний объекта:

$$\{\Omega_p\} = \Omega; p=1 \div P. \quad (8)$$

Каждый такой вид состояний описывается вектором признаков в N -мерном пространстве признаков:

$$\Omega_p = (\prod_{1p}, \prod_{2p}, \dots, \prod_{np}, \dots, \prod_{Np}); n=1 \div N; \forall p \in P. \quad (9)$$

В общем виде все физические состояния технологического объекта описываются множеством признаков:

$$\Omega_p = \{\prod_{np}\}; \forall n \in N; \forall p \in P. \quad (10)$$

Таким образом, необходимо рассматривать два признаковых пространства $\{\prod_{lq}\}$ и $\{\prod_{np}\}$, элементы которых могут быть одной физической природы или отражать совершенно разные свойства. Так, например, в пространстве $\{\prod_{lq}\}$ все параметры и признаки связаны со свойствами информационного сигнала отклика, а признаковое пространство $\{\prod_{np}\}$ может представлять параметры изменения свойств технологического объекта.

Решение о наблюдаемости активизированных физических объектов можно выполнить с использованием системы оценок $\{a\}$, представляющих информативность параметров и признаков $\{\prod_{lq}\}$ на признаковом пространстве $\{\prod_{np}\}$, т.е. обеспечивающих оценку связи этих признаковых пространств:

$$\{\prod_{lq}\} \overset{(\bar{a})}{\leftrightarrow} \{\prod_{np}\}. \quad (11)$$

Информативные признаки можно выбрать из множества $\{\prod_{lq}\}$ в зависимости от априорной информации о способе представления модели технологического объекта.

Так как для рассматриваемого случая технологический объект можно описать только по результатам эксперимента, то все необходимые параметры и признаки свойств информационного сигнала отклика и технологического объекта должны определяться методами непараметрической идентификации. В случае ограниченной априорной информации следует применять методы распознавания, позволяющие связать оба признаковых пространства за счет соответствующих статистических процедур.

На практике наиболее широко распространен метод получения оценок из множества $\{a\}$ на основе регрессионного анализа при линейной парной регрессии. В более сложном случае можно применить и другие виды статистического анализа, включающие многомерный регрессионный и корреляционный анализы.

Таким образом, исходя из известных представлений об автоволновом характере локализованной пластичности, можно автоволновую природу локализации пластической деформации представить в рамках двухкомпонентной модели самоорганизации пластического течения [9]. В соответствии с ранее сделанными замечаниями можно предположить, что в процессе деформации объект, как активная среда, самопроизвольно разбивается также на две подсистемы: динамическую и диссипативную. Взаимодействие этих подсистем вызывает, согласно Кадомцеву [10], самоорганизацию, в том числе и в виде автоволн различных типов. Причем динамическая подсистема включает в себя процессы движения дислокаций и их ансамблей, которые ответственны, собственно, за формоизменение. Поэтому для рассматриваемого случая динамическую подсистему можно считать информационной подсистемой.

Математическую реализацию подобной двухкомпонентной модели применительно к автоволнам локализации пластической деформации можно представить системой реакционно-диффузионных дифференциальных параболических уравнений:

$$\varepsilon = f(\varepsilon, \sigma) + D_\varepsilon \times \varepsilon'' ; \sigma = g(\sigma, \varepsilon) + D_\sigma \times \sigma'' , \quad (12)$$

где ε и σ – соответственно пластическая деформация и напряжение в материале объекта; $f(\varepsilon, \sigma)$ и $g(\sigma, \varepsilon)$ – нелинейные функции, описывающие точечные кинетики и имеющие смысл скоростей изменения соответственно деформации и напряжения на микроскопическом уровне; $D_\varepsilon \times \varepsilon''$ и $D_\sigma \times \sigma''$ – «диффузионные» члены, аналогичные коэффициентам диффузии и задающие макро- и мезомасштабное перераспределения соответственно деформаций и напряжений.

В частности, $f(\varepsilon, \sigma)$ при однородном распределении дислокаций эквивалентна уравнению дислокационной кинетики Тейлора – Орована и может быть представлена как

$$\varepsilon = b \times \rho_d \times V_d , \quad (13)$$

где b – вектор Бюргерса, ρ_d – плотность подвижных дислокаций, V_d – скорость их движения.

Из рассмотренной двухкомпонентной модели самоорганизации пластического течения непосредственно следует существование упруго-пластического инварианта автоволн локализованной пластической деформации. В этом случае инвариант отражает взаимную обусловленность деформационных процессов на микроскопическом и макроскопическом уровнях. При этом деформационные дефекты микроскопического уровня, взаимодействуя с фононной подсистемой нагруженного объекта, формируют движущиеся макроскопические очаги локализованной деформации, то есть автоволну, что говорит о наличии связи упруго-пластического инварианта с решеточными свойствами кристаллов и фононной плотностью материала объекта.

В этом случае в качестве первого информативного параметра следует взять величину пластической деформации ε , а в качестве второго информативного параметра – относительное изменение скорости ползучести материала объекта [11]:

$$\xi = (V_\varepsilon - V_{\varepsilon 0}) / V_{\varepsilon 0} , \quad (14)$$

где V_ε и $V_{\varepsilon 0}$ – скорости пластической деформации соответственно при активации физическими полями и без активации в зависимости от величины параметров этих физических полей.

Таким образом, исходя из проведенного анализа, можно сделать вывод о том, что для получения информационного сигнала следует использовать метод полупроводниковой тензометрии [12]. Преимущества данного метода заключаются в новых широких возможностях, которые открывают полупроводниковые тензодатчики для экспериментаторов, работающих в области исследования прочности материалов и конструкций, для конструкторов сверхминиатюрных преобразователей механических величин (силы, давления, момента и т. д.) в электрические сигналы.

Основными свойствами полупроводниковых тензодатчиков, отличающими их от проволочных и фольговых тензодатчиков, являются весьма малые размеры, очень высокая тензочувствительность (на два порядка выше, чем у проволочных датчиков), высокий уровень выходного сигнала измерительных схем, делающий ненужными сложные, громоздкие и дорогие усилители. Важнейшей особенностью полупроводниковых тензодатчиков является возможность изменять в широких пределах их механические и электрические свойства, что принципиально неосуществимо в проволочных датчиках.

Основным отличием полупроводниковых тензодатчиков от проволочных является большое (до 50%) изменение сопротивления тензодатчика при деформации. Это отличие определяет интерес к полупроводниковым тензодатчикам, позволяет использовать их там, где проволочные тензодатчики непригодны.

Кроме того, характеристики системы «тензодатчик—измерительный прибор» определяются не только свойствами тензодатчика и измерительной схемы, но и свойствами источника питания. При этом характер источника питания (источник тока или источник напряжения) может существенно изменять выходные характеристики системы в целом.

Применение полупроводниковых тензодатчиков позволяет просто реализовать устройства для преобразования деформации, например, в последовательность электрических импульсов, частота или скважность которых зависят от измеряемой деформации. Такие импульсы могут непосредственно записываться на соответствующие регистраторы, телеметрироваться и т.п., что особенно важно для измерений деформаций на нестационарных объектах.

Методы интенсификации вариаций пластических свойств металлов

К относительно новым методам интенсификации пластических свойств металлов, а также улучшения каких-либо технологических параметров можно отнести следующие: электро- и магнито-стимулированная деформация, вибрационное и акустическое воздействие и т.д. [13]. Некоторые преимущества, полученные с помощью интенсификации данными методами, носят качественный, а не количественный характер.

Например, в работе [13, 14] показывается, как инициируется движение краевых дислокаций одним только слабым однородным постоянным магнитным полем (магнитная индукция B меняется от 0.1 до 1.6 Т) в отсутствие внешних механических напряжений. Примечательно, что слабое магнитное поле – один из факторов внешней природной среды, постоянно влияющий на все процессы вокруг нас. В отличие от влияния слабых магнитных полей в сильных импульсных полях исследователи наблюдали изменения необратимого характера. Так же магнитное поле оказывает достаточное сильное влияние на фазовые превращения, будь то зарождение кристаллов, морфология или кинетика роста.

В качестве примера так же можно привести эффект влияния вибраций на процесс волочения, при котором наблюдается практически двукратное снижение усилия волочения и существенно сильное увеличение срока службы волочильного инструмента [15]. Все эти и прочие явления показывают принципиальные возможности для интенсификации изменений пластических свойств, а также улучшения технологических

параметров процессов обработки материалов давлением, стойкости инструмента, повышение КПД, управление свойства заготовок и готовой продукции и многих других полезных для промышленности моментов. С научной точки зрения все эти процессы также представляют собой большой интерес, так как имеют достаточно высокий уровень неопределенности в их теоретическом обосновании, несмотря на то, что часть из них базируется на известных соответствующих научных гипотезах.

В качестве еще одного примера можно привести интересный динамический эффект в деформируемых кристаллах, проявляющийся в излучении электромагнитных волн, сопровождающих движение дислокаций, а также зарождение и развитие трещин [16].

Перемещение дислокаций вызывает возмущение как кристаллической решетки, так и электронной подсистемы кристаллической структуры. Первое, как известно, приводит к появлению в образце упругих волн, второе влечет за собой электромагнитную эмиссию, характер которой определяется как индивидуальными свойствами дислокации, так и свойствами среды, в которой распространяется электромагнитная волна. При этом даже малая доля механической мощности, затрачиваемой на деформацию кристаллической структуры, преобразуется в энергию электромагнитного излучения дислокаций, величины которой вполне достаточно для экспериментальной регистрации обсуждаемых эффектов.

В конце XX столетия в мире велись активные исследования в области таких явлений, как электронно-пластический эффект (ЭПЭ). Например, широкому кругу специалистов были хорошо известны актуальные на тот момент времени теоретические воззрения и практические данные в области изменения физико-механических свойств металлов под воздействием электрического тока высокой плотности. В связи с этим особое внимание уделялось вопросам, связанным с новым физическим явлением, названным ЭПЭ, т.е. увеличение пластических свойств металлов при нетепловом (прямом) воздействии тока на деформирование образцов [17].

При ЭПЭ результатом действия тока высокой плотности на пластическую деформацию металла является интенсификация процессов существенного (на десятки процентов по сравнению с эквивалентным тепловым действием) увеличения пластичности и снижения сопротивления деформированию испытываемых образцов, которые в свою очередь сопровождаются эмиссией электронов с поверхности этих деформируемых образцов

Максимум действия тока приходится на предел текучести материала испытываемых образцов, при котором происходит "запуск" и размножение дислокаций. Синхронно с прохождением тока появляются свежие полосы скольжения на поверхности кристаллических элементов структуры материала испытываемых образцов и возникают всплески электронной эмиссии. В результате действия тока существенно (на 100–120%) увеличивается пластическая деформация, предшествующая хрупкому разрушению кристаллических элементов.

В результате электропластической деформации поле внутренних напряжений в кристаллической структуре материала обладает уже более слабой нерегулярностью. Поэтому преобладают единичные открепления движущихся в плоскости скольжения дислокаций от дислокаций леса, т.е. скопления дислокаций в участках зерен с образованием зон высокой плотности дислокаций. Образующиеся при этом диполи имеют плечи, несильно отличающиеся по величине от вектора Бюргерса, а время диффузионного рассасывания – малым по сравнению со временем деформирования. В результате дислокационные диполи в большей своей части вырождаются в пороги, а дислокации уже вместе с порогами легко двигаются через дислокационный лес. При этом имеет место ускорение перемещения индивидуальных дислокаций, увеличение доли механизма пересечения дислокационного леса по сравнению с механизмом петлеобразования, что в итоге и предопределяет возможность интенсификации источников дислокаций.

Возможный механизм ЭПЭ строится с учетом основных положений динамической, инерционной и термофлуктуационной теорий, которые в той или иной мере подтверждаются экспериментальными данными [18].

Следует заметить, что изучение общих закономерностей действия тока на пластическую деформацию металла проводят обычно с использованием простого метода растяжения (или сжатия) образцов в изолированных зажимах испытательной разрывной машины, который считается важнейшим методом экспериментального изучения процессов пластической деформации металлов.

При постоянстве сдвигового напряжения испытания являются статическими или испытаниями методом ползучести при постоянном напряжении. В случае же постоянства скорости сдвига или скорости удлинения образцов испытания являются динамическими или испытаниями с постоянной скоростью деформирования.

Из проведенного анализа возможных механизмов интенсификации пластических свойств металлов можно сделать предположение о том, что при соответствующем резонансном режиме воздействия на определенные 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 [19]. 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.

Для исследования эффектов магнитоупругого взаимодействия и электромагнитно-акустического преобразования (комбинированная активация), активизируемых одновременным и согласованным резонансным воздействием постоянного и переменного магнитных полей с малыми параметрами на элементы структуры материала технологического объекта требуется соответствующий испытательный стенд, реализующий необходимые испытания методом ползучести при постоянном напряжении. При этом испытательный стенд должен удовлетворять следующим требованиям: 1 – возможность изменения переменного и постоянного магнитных полей в очаге деформации; 2 – возможность изменения скорости волочения; 3 – приемлемая точность измерения усилия волочения; 4 – технологичность и экономичность конструкции.

Техническая реализация испытания методом ползучести

В качестве примера технической реализации испытания метода ползучести при постоянном напряжении можно привести испытательную установку для проведения электро-пластического волочения вольфрамовой и медной проволоки, блок-схема которой представлена на рис. 1 [20], где 1 – обрабатываемая проволока; 2 – контакты; 3 – волока; 4 – система подвижных блоков; 5 – балочка с тензодатчиками; 6' и 6'' – соответственно сдаточная и приемная катушки; 7 и 11 – блоки питания; 8 – генератор; 9 – усилитель; 10 – осциллограф; 12 – регистратор; 13 – усилитель постоянного тока.

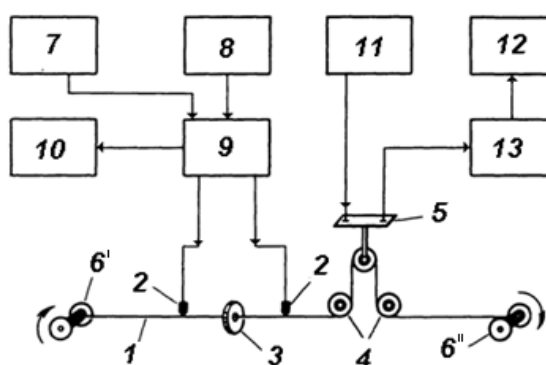


Рисунок 1 – Блок-схема установки для исследования электропластического волочения металла

Данная установка реализует способ волочения, заключающийся в том, что вдоль заготовки 1 через два скользящих латунных или графитовых скользящих контакта 2 пропускают электрический ток в импульсном режиме. Проволока на расстоянии 60–70 мм перед волокой и 40–50 мм после нее, подвергающаяся нагреву вследствие действия тока, охлаждается проточной эмульсией. Усилие волочения измеряется с помощью балочки с тензометрическим мостом. Посредством тензометрического моста на балочке производится постоянный замер усилия волочения. Точность определения усилий волочения при этом составляла 10^{-2} Н. Скорость волочения изменяется от 8 до 200 м/мин.

Представленную на рис. 1 схему установки для электропластического волочения металла с небольшими изменениями можно взять за основу соответствующего испытательного стенда, в котором будут исключены скользящие контакты, необходимые для подвода тока в зону деформации. Вместо них будет установлен соленоид для генерации переменного магнитного поля и постоянный магнит, а остальные функциональные узлы стенда останутся без изменения. Блок-схема такого стенда представлена на рис. 2, где 2 и 14 – соответственно соленоид для генерации переменного магнитного поля и постоянный магнит.

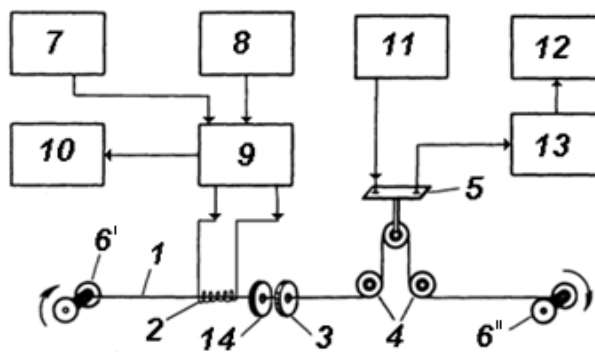


Рисунок 2 – Блок-схема установки для исследования волочения металла с комбинированной активацией

На рис. 3 представлены конструктивные особенности постоянного магнита 14, представляющего собой четырехполюсную планшайбу, внутри которой размещается заготовка 1. Намагниченные внутренние полюса планшайбы создают внутри структуры заготовки 1 поперечное магнитное поле определенной пространственной конфигурации.

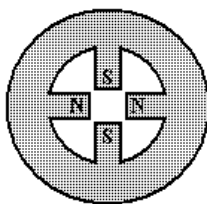


Рисунок 3 – конструкция постоянного магнита

При функционировании установки, представленной на рис. 2, осуществляется одновременное воздействие в очаге деформации на заготовку 1 электромагнитным потоком, наводимым посредством переменного электрического тока соленоида 2, и постоянным магнитным полем, создаваемым магнитом 14 в плоскости, ортогональной направлению электромагнитного потока.

При этом электромагнитное поле, возбуждаемое в очаге деформации, трансформируется в колебание элементов структуры деформируемого металла, вызывая в структурных связях периодические знакопеременные напряжения (сжатия и растяжения), которые ослабляют характеристики прочности металла, т.е. снижаются критические

значения пределов упругости, текучести и прочности. В свою очередь постоянное магнитное поле заметно влияет на подвижность дислокаций и макропластичность за счет взаимодействия дислокаций с границами доменов, движущимися при намагничивании или перемагничивании. Подобное влияние слабых магнитных полей на неупругие и пластические свойства твердых тел различной природы наблюдается на всех структурных уровнях и степенях деформации.

Кроме того, магнитное поле может действовать на квазихрупкое разрушение, усталость, износ и т.п. и по другим недислокационным каналам. Иными словами, магнитное поле может индуцировать многостадийные параллельно-последовательные процессы релаксации дефектной структуры, часть которых имеет уникальный характер и не может быть инициирована термообработкой, механическими воздействиями и т.п.

Следует отметить, что неравновесность, существующая в структуре заготовки, исходно или непрерывно подпитываемая извне тем или иным способом (нагрузением, освещением, облучением и др.), является необходимым и важнейшим фактором, обеспечивающим высокую чувствительность дефектной структуры к внешним или внутренним магнитным полям. Поэтому слабое магнитное поле может эффективно действовать только на неравновесные системы (спиновые, молекулярные), проходящие в своей эволюции через короткоживущие возбужденные состояния, в которых может быть изменена мультиплетность.

Обобщая, можно констатировать, что индуцированные совместным резонансным воздействием переменным и постоянным магнитными полями механические отклики в очаге деформации являются результатом сложного, многостадийного процесса, начинающегося на уровне электронных возбуждений в структурных дефектах.

При этом объемно-напряженное состояние металла в очаге деформации характеризуется напряжениями растяжения, направленными вдоль оси заготовки, и напряжениями сжатия, направленными ортогонально оси заготовки.

Одним из основных вопросов, требующим особого внимания при проведении исследований на установке для волочения металла с комбинированной активацией, является подбор соответствующего двигателя, непосредственно осуществляющего вытяжку металла. Для этого требуется адекватно оценить возникающее усилие волочения.

Известно, что наибольшее распространение для расчета усилия волочения получила формула Красильщикова [1]:

$$P_v = 0,6d_0^2 \sqrt{\delta_{ед}^{cp} \times \sigma_{в.ср}}, \quad (15)$$

где d_0^2 – диаметр проволоки до волочения; $\delta_{ед}^{cp}$ – среднее относительное обжатие; $\sigma_{в.ср}$ – средний предел прочности проволоки

В связи с тем, что в установке будет сложно обеспечить адекватную смазку металла, подвергающегося волочению, и возможны колебания механических свойств заготовки, будет применяться менее качественный (в виду отсутствия надобности его повышенной стойкости как у промышленного инструмента) волочильный инструмент, а также компенсации прочих возможных факторов, увеличивающих усилие волочения, полученное расчетное значение рекомендуется увеличить на 40%.

Наиболее приемлемым технологическим объектом для проведения соответствующих исследований в силу определенных объективных причин является стальная низкоуглеродистая проволока (с приемлемым шагом диаметров 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2 мм) обыкновенного качества (ГОСТ 3282-74), изготовленная методом многократного холодного волочения. Следует отметить, что исходным сырьем для производства данной проволоки служит горячекатаная катанка диаметром 5,5÷9 мм. Поэтому целесообразнее всего конструировать испытательный стенд для работы с данным видом проволоки и указанным диапазоном ее диаметров.

Для проведения исследований на установке волочения выберем проволоку с номинальным диаметром 1,4 мм. В экспериментах планируется использовать

отожжённую проволоку с пределом прочности $30\div 50\text{кГ/мм}^2$ согласно вышеуказанному ГОСТу. После каждой протяжки предел прочности заготовки несколько повышается. Поэтому после однократного волочения придадим пределу прочности заготовки значения 60кГ/мм^2 . Тогда средний предел прочности составит 55кГ/мм^2 , а среднее относительное обжатие в данном случае будет вычисляться по формуле:

$$\delta_{\text{ед}}^{\text{ср}} = \frac{d_0^2 - d_n^2}{d_0^2} \times 100\%, \quad (16)$$

где d_n^2 – диаметр проволоки после волочения.

Далее определимся с номинальным диаметром волюки, приняв его равным 1 мм. Подставив все числовые значения в формулу (1), получим значение усилия волочения – 58 кГ. С учетом добавления 40% получим окончательное значение усилия волочения, равное 81,5 кГ. Зная это значение, а также диаметр приемной катушки 6" (рис. 2), несложно выбрать подходящий по моменту и по скорости вращения, а также по прочим конструктивным параметрам электродвигатель с соответствующим редуктором.

Кроме того, одной из важнейших решаемых задач при проведении исследований на установке для волочения металла с комбинированной активацией является подбор балочки 5. Следует отметить, что излишняя жесткость балочки с тензодатчиками, так же, как и излишняя ее податливость, сказывается негативно на качестве работы стенда в целом.

Например, в случае излишней жесткости, вследствие уменьшения порядка величины деформации, влияющего на тензодатчик, а также увеличения требований к точности измерения электрического напряжения с тензометрического полумоста будет заметно ухудшаться точность измерений. В свою очередь при высокой податливости могут проявляться нежелательные моменты в работе конструкции в виде остаточных деформаций либо отклеивания тензодатчиков от балочки, лишние упругие движения всей конструкции, общее снижение надежности.

В связи с этим важнейшим фактором при проведении исследований для рассматриваемого случая является корректный расчет параметров балочки [21].

Например, зная рабочее усилие, можно произвести подбор соответствующей балочки 5 (рис. 2). Исходя из того, что балочка подвергается простому изгибу, а необходимое усилие ранее уже вычислено, выбираем материал для заготовки в виде стали 3, для которого требуемое сечение можно рассчитать методами сопротивления материалов.

Для ускорения процесса и повышения точности, а также для возможности в будущем быстро корректировать необходимые параметры расчета балочки, на которой будет закреплен тензометрический полумост, произведем в среде моделирования Solid Works Simulation (статический анализ методом конечных элементов) для следующих параметров: сечение – 4×30 мм, длина – 80 мм, материал – сталь 3, сила волочения – 70 кГ. Пример подобного расчета представлен на рис. 4.

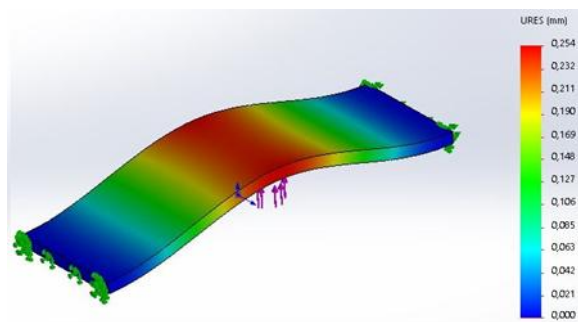


Рисунок 4 – Пример расчета прогиба балочки с тензодатчиками для случая симметричного краевого защемления пластины

Заключение

Необходимость исследований поведения объектов различных технологических процессов механической обработки при нагружении продиктована широким спектром теоретических и практических задач, возникающих при соответствующем анализе состояния технологического объекта. Для решения этих задач требуется знание не только механических свойств технологического объекта, но и механизмов его деформации, которые следует использовать для оценки эволюции его напряженно-деформированного состояния.

Предложенный вариант устройства для исследования волочения металла с комбинированной активацией позволит уточнить главные закономерности процессов макролокализации деформации твердых тел при нагружении и в определенной мере развить автоволновую модель пластичности при одновременном резонансном воздействии на кристаллическую решетку и электронную подсистему кристаллической структуры пространственно скрещенными постоянным и переменным магнитными полями.

Рассмотренные варианты возможных механизмов управления процессами пластического течения позволят исследователям и разработчикам наилучшим образом выстроить соответствующую методику проведения экспериментальных исследований и сформулировать адекватную интерпретацию их результатов.

Литература

1. Рудской, А.И. Волочение / А. И. Рудской, В. А. Лунев, О. П. Шаболдо.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 126 с.
2. Альшиц, В.И. Резонансная магнитопластичность в сверхнизких магнитных полях/ В.И. Альшиц, Е.В.Даринская, М.В.Колдаева, Е.А.Петржик// Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – № 5. – С. 362–373.
3. Головин, Ю.И. Магнитопластичность твердых тел/ Ю.И. Головин// Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46. – №5. – С.769–803.
4. Гун, Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением/ Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
5. Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.
6. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам/ Г. Хакен. – М.: УРСС, 2014. – 317 с.
7. Хамзин, А.А. Квантовая теория неравновесных процессов/А.А Хамзин. – Казань: Казан.ун-т, 2017. – 99 с.
8. Биккин, Х.М. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика/ Х.М. Биккин, И. И. Ляпилин. – Екатеринбург :УрО РАН, 2009. – 500 с.
9. Панин, В.Е. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системы /Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. // Успехи физ. наук. – 2012. – Т. 182. – №12. – С. 1351–1357.
10. Давыдов, В.А. Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах/ В.А. Давыдов, В.С. Зыков, А.С. Михайлов// Успехи физических наук. – 1991. – Т. 161. – № 8. – С. 45–85.
11. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов/ В.П.. Алехин. – М.: Наука,1983. – 280 с.
12. Котюк, А.Ф. Датчики в современных измерениях/ А.Ф Котюк. – М.: Радио и связь, Горячая линия-телеком, 2006. – 96 с.
13. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел/Ю.И. Головин//Физика твердого тела. –2004. – Т. 46. – №5. – С.769–803.
14. Судзуки, Т. Динамика дислокаций и пластичность/Т. Судзуки, Х. Ёсинага, С. Такеути. –М.: Мир, 1989. – 296 с.

15. Васильев, А.И. Электромагнитное возбуждение звука в металлах/ А.И. Васильев, Ю.И. Гайдуков.// Успехи физических наук. – 1983. – Т.141. –№3. – С. 431—467.
16. Васильев А. Н. Электромагнитное возбуждение звука в металлах/ А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, С.Ю. Гуревич. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 339с.
17. Спицын, В.И. Электропластическая деформация металлов/ В.И Спицын, О.А. Троицкий. – М.: Наука, 1985.– 160 с.
18. Зуев, Л.Б. Физика макролокализации пластического течения/ Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. – Новосибирск: Наука, 2008. – 327 с.
19. Брякин, И.В. Анализ возможных механизмов управления параметрами технологического процесса волочения/ И.В. Брякин, Е.И. Дьяченко//Проблемы автоматизации и управления. – 2022. – № 2 (44). – С. 92–103.
20. Спицын, В.И. Однофильерное электропластическое волочение тончайшей медной проволоки/ В.И Спицын, О. А.Троицкий, В.Г. Рыжков, А.С. Козырев//Докл. АН СССР. – 1976. – Т. 231. – С. 402–404.
21. Тихонов, А.И. Упругие элементы датчиков механических величин/А.И. Тихонов, В.А. Тихопенков,Е.А.Мокров. – Ульяновск: У ГТУ, 1998. – 120 с.