

УДК 621.7.044.7

Кузнецов Н. Н.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРО- И МАГНИТНОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАГОТОВКУ

В последнее время возросло количество исследований, посвященных электромеханическим способам обработки металлов (изменение физико-механических свойств во время и после деформирования заготовки), причем, добиваются как разупрочнения [1–3], так и упрочнения верхних слоев металла [4]. Внешнее импульсное токовое воздействие, как и магнитное, может быть универсальным инструментом в обработке металлов давлением, а также и для изменения физико-механических свойств металлов и сплавов. Однако, при растущем использовании этих воздействий для интенсификации различных технологических процессов холодной обработки, физическая природа пластификации металлов и сплавов изучена недостаточно [5].

Целью данной работы является изучение и анализ закономерностей воздействия сильных токовых импульсов и импульсов магнитного поля на металлы и сплавы как на макро-, так и на микроуровнях.

Электромагнитные воздействия можно рассматривать как непосредственное энергетическое действие на атомы решетки металлов, которые связаны силами электромагнитного происхождения. Наиболее известный – электропластический эффект заключается в скачкообразном снижении напряжений течения материала под нагрузкой при пропускании через него «негреющих» импульсов тока со следующими характеристиками: плотность тока $j = 10^3$ А/мм², длительность импульса $\tau \leq 100$ мкс. За все время изучения электростимулированной пластической деформации [6, 7] был выполнен в основном анализ возможных механизмов снижения сопротивления деформирования: теплового эффекта, скин-эффекта, пинч-эффекта. Данный эффект также можно рассматривать, основываясь на возникновении термоупругих напряжений. Плотность тока в образце металла распределяется неравномерно, а это приводит к неравномерному нагреву, причем, максимальная температура будет на поверхности образца. Как показывает расчет и экспериментальные данные [8, 9], температура поверхности образца может достигать несколько сот градусов. Этот разогрев и ведет к появлению термоупругих напряжений (см. рис. 1, 2), которые могут быть одной из причин рассматриваемого эффекта.

Расчеты показывают [8], что время релаксации температуры в металлах много больше времени диффузии электромагнитного поля в металл. Поэтому можно считать, что процесс разогрева образца происходит в течение времени действия импульса тока или поля, а время существования термоупругих напряжений будет определяться процессом релаксации температуры. На наш взгляд этот фактор и дает возможность наблюдать разупрочняющее действие импульсов электромагнитного поля в экспериментах по растяжению [3], т. к. время срабатывания регистрирующей аппаратуры любой испытательной машины ($\tau_m \sim 10^{-1}$ с) много больше времени самого импульса ($\tau_u = 10^{-3}$ с).

С другой стороны, в дефектных зонах может происходить динамический отжиг, который протекает практически мгновенно за счет процессов диффузии. Эта модель, построенная на градиенте электрического потенциала, доказывает, что возникающие термические напряжения приводят к «залечиванию» микро- и макротрещин.

В рамках модели Кравченко В. Я. [10], где рассчитано движение равномерно движущейся изолированной дислокации, которое происходит от давления на нее потока электронов, увлекаемых внешним электрическим полем. Расчеты в этой модели показывают, что сила электрон-дислокационного действия не чувствительна к длительности импульсов тока.

Попытки снизить нагрев за счет уменьшения длительности импульса приводят к резкому падению эффекта разупрочнения, что ни как не вытекает из теории. В этом случае необходимо учитывать так называемый «дробовой эффект», в результате которого локально сообщаемый импульс может быть больше, чем усредненный по сегменту, в несколько раз. Как ни трудно объяснить этот эффект разупрочнения в рамках этой теории, но она не противоречит экспериментам и реальным технологическим процессам прокатки, волочения и прессования труднодеформируемых металлов.

Еще одна концепция видения природы электропластического эффекта заключается в рассмотрении концентраторов напряжений, в которых протекают основные деформационные процессы на различных микроуровнях. Материал в этих зонах специфически аномально реагирует на внешнее воздействие. За счет перестройки дефектной подсистемы деформированного тела формируются особые типы субструктур, что и объясняет изменение механических характеристик под действием импульсов тока [11].

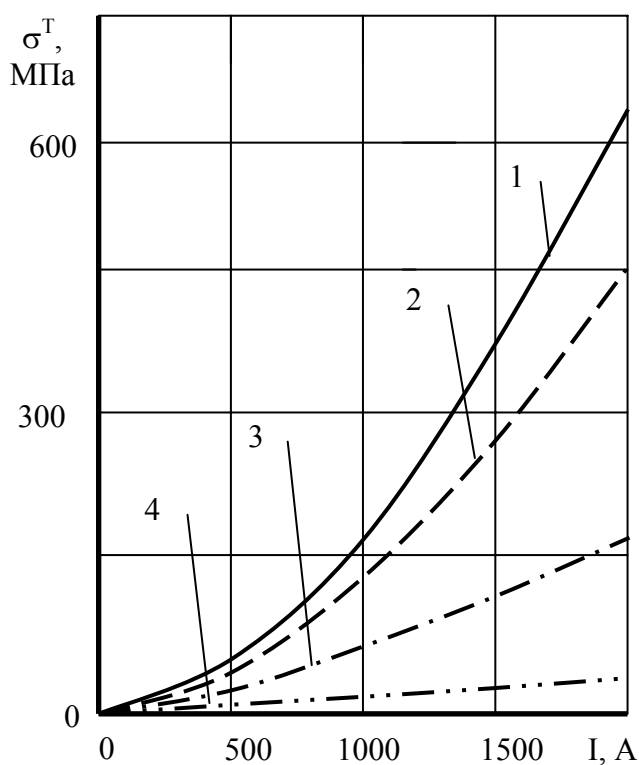


Рис. 1. Зависимость термоупругих напряжений для меди М1 при воздействии импульса тока от силы тока при следующих радиусах образца, мм:

1 – 0,25; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 1,0 $\tau^* = 0,1$

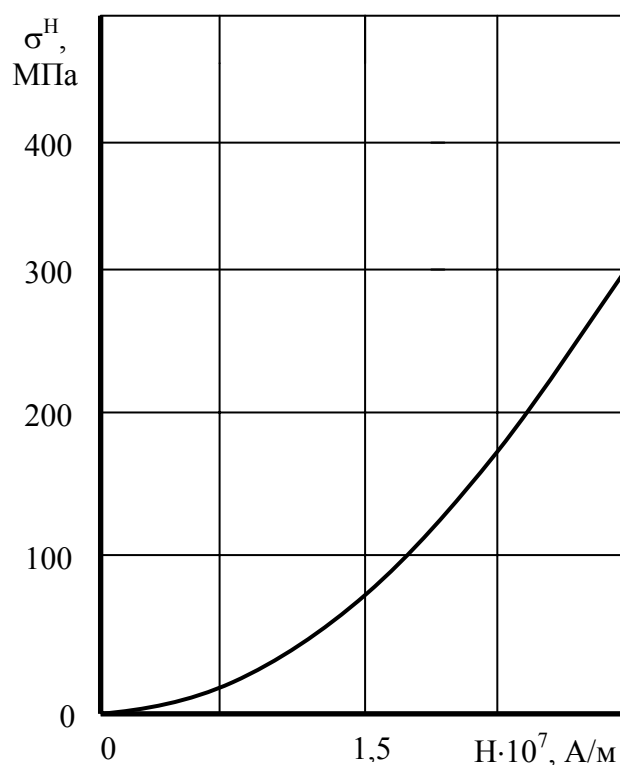


Рис. 2. Зависимость термоупругих напряжений для меди М1 при воздействии импульса магнитного поля от его напряженности

Методику проведения испытаний для исследования электропластического эффекта в основном осуществляют по двум направлениям: испытания на растяжение-сжатие совместно с воздействием импульсов тока и магнитного поля; металлографические исследования модификации структуры и фазового состава сталей и сплавов под воздействием импульсов тока. В испытаниях на растяжение-сжатие получают информацию об изменении поведения металла непосредственно в ходе холодной пластической деформации, что выявляется в снижении силы деформирования на 15–20 %, а также в увеличении относительной деформации на 10–15 % как для токового, так и для магнитного воздействия. Приведенные значения являются практически максимально возможными. При увеличении степени деформации происходит постепенное снижение эффекта разупрочнения. Обработка током и магнитным

полем металлов и сплавов без деформации показала, что механические и пластические свойства остались на том же уровне, как до обработки. Этот факт говорит в пользу дислокационных моделей, описывающих электропластический эффект.

В процессе пластической деформации под воздействием импульсных электромагнитных полей [11] все подсистемы поликристалла взаимодействуют между собой, в результате внутри них возникают различные структурные дефекты. Эти структуры как источники внутренних напряжений релаксируют, т. е. распадаются и переходят в новые структуры. Рассматривая этот процесс на основе нелинейных дифференциальных уравнений для автономных (самоорганизующихся) систем, были получены динамические уравнения эволюции пластической деформации, которые адекватно описывают скачки снижения напряжения в материале, обрабатываемом импульсами электромагнитных полей.

Металлографические исследования более разнообразны по сравнению с испытаниями на растяжение сжатие. Эти исследования направлены на изучение механических свойств и структур металлов, сплавов и биметаллов. Наиболее актуальны эти исследования для сплавов на основе железа, кремния и алюминия, которые подвержены хрупкому разрушению [12]. В исследовании производится сравнение образцов, обработанных традиционным способом и с применением постоянного электрического тока. После проведенного рентгеноструктурного анализа было установлено повышение трещиностойкости, и причиной этого эффекта может служить перераспределение вакансий между β и γ - подрешетками. Кроме этого, наряду с пропуском постоянного тока осуществлялось воздействие на сталь X18H10T импульсных токов [13]. Опыты показали, что в этом случае электростимулирование способствует двойникованию в стали путем роста старых и образованию новых двойников. Но что наиболее важно, и это уже отмечалось, – электростимулирование не приводит к качественному изменению дислокационной субструктуры стали. Изменения касаются только лишь величины плотности дислокаций. В конечном итоге, электростимулирование приводит к результатам, получаемым в ходе термической обработки материала.

Большой интерес вызывает обработка биметаллических материалов [14]. Методика исследований состояла в следующем: биметаллическую композицию, которая состояла из сталей 40ХНМА и 38ХНЗМФА, наплавленных сталями 07Х25Н12Г2Т и 08Х19Н9Ф2С2, обработанными импульсными токами и импульсами магнитного поля, проверяли на усталостную прочность. Усталостная прочность у материала, обработанного током и магнитным полем оказалась значительно выше, чем необработанного. Это объясняется получением после обработки мелкого зерна аустенитно-мартенситной структуры. Также такая обработка благоприятно отражается и на другие эксплуатационные характеристики, например [6], на коррозионную стойкость этого биметаллического материала.

Широкие возможности значительных изменений прочностных, пластических и эксплуатационных характеристик, а также в связи с хорошей управляемостью процесса наведения электромагнитного воздействия и локальностью, выгодно отличают электромагнитные методы обработки от традиционных для создания новых технологических процессов ОМД. Перспективными направлениями использования эффектов пропускания электромагнитных импульсов через заготовку в производстве можно отнести следующее:

- разупрочнение и восстановление ресурса пластичности, уменьшение уровня остаточных напряжений, что дает основания для замены традиционной термической обработки на электроимпульсное воздействие;
- «залечивание» исходных дефектов структуры деталей и дефектов, полученных при циклическом нагружении, которое в некоторых случаях может дать и полное восстановление структуры.

ВЫВОДЫ

Таким образом, эффект концентрации различных физических полей в окрестностях макронеоднородностей (трещины, включения, микродефекты) по законам, которые аналогичны с концентрацией механических напряжений, позволяет пластифицировать и снижать

уровень остаточных напряжений импульсным током и магнитным полем во всем объеме материала при испытаниях и обработке давлением. Следует также добавить, что реально электромагнитное поле воздействует на всех структурных уровнях: микро-, макро-, мезо- и практически во всех случаях конечный результат является следствием совместного действия множества вышеизложенных эффектов, проходящих на разных уровнях строения материала.

Эти механизмы взаимодействия структурных дефектов с электрическим и магнитным полями недостаточно ясны, а многие наблюдения и вовсе противоречивы. Это все требует дальнейших фундаментальных исследований в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев Е. В. О влиянии импульсных магнитных полей на закономерности деформирования металлов при низких температурах / Е. В. Воробьев, Е. В. Стрижало // Проблемы прочности. – 1986. – № 4. – С. 42–45.
2. Стрижало В. А. Скачкообразная деформация металла в условиях воздействия импульсного магнитного поля и криогенных температур / В. А. Стрижало, Е. В. Воробьев // Проблемы прочности. – 2003. – № 1. – С. 137–139.
3. Троицкий О. А. Электропластическая деформация стали растяжением и волочением / О. А. Троицкий // Сталь. – 1974. – № 5. – С. 450–459.
4. Исследование влияния импульсных воздействий на коррозионную стойкость металлических и биметаллических материалов / В. Л. Володин, В. Д. Тхай, Ю. Д. Коньков, В. В. Гайдук, Т. В. Володин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2002. – № 6. – С. 17–20.
5. Спицын В. И. Электропластическая деформация металлов / В. И. Спицын, О. А. Троицкий. – М. : Наука, 1985. – 160 с.
6. Громов В. Е. О механизмах электропластического эффекта в металлах / В. Е. Громов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1989. – № 10. – С. 71–75.
7. Климов К. М. Особенности пластической деформации металлов в электромагнитном поле / К. М. Климов, И. И. Новиков // Докл. АН СССР. – 1980. – Т. 253. – С. 603–610.
8. Белых В. Г. Расчет термоупругих напряжений в металле при воздействии импульсами магнитного поля / В. Г. Белых, Н. Н. Кузнецов, А. В. Тышкевич // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тем. зб. наукових праць. – Краматорск. – 1998. – Вып. № 4. – С. 282–287.
9. Кузнецов Н. Н. Анализ распределения температурных полей и термоупругих напряжений в металле при воздействии импульсами магнитного поля и тока / Н. Н. Кузнецов, В. Г. Белых, К. Д. Махмудов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тем. зб. наукових праць. – 2003. – С. 424–428.
10. Кравченко В. Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации / В. Я. Кравченко // ЖЭФТ. – 1966. – Т. 51. – Вып. 6 (12). – С. 1676–1688.
11. Бусов В. Л. Динамические уравнения эволюции пластической деформации под воздействием импульсных электромагнитных полей / В. Л. Бусов, Н. Н. Кузнецов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тем. зб. наукових праць. – Краматорськ, 2007. – С. 178–183.
12. Помельникова А. С. Изменение структуры и свойств сплавов железо-кремний-алюминий под влиянием электрического тока / А. С. Помельникова, В. Н. Перетяцько, Е. Р. Браунштейн, С. А. Лякушин, Г. А. Шипко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1997. – № 6. – С. 63–65.
13. Модификация структуры и фазового состава стали X18H10T импульсным током / В. В. Коваленко, Ю. Ф. Иванов, Э. В. Козлов, В. Е. Громов, О. В. Соснин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2000. – № 10. – С. 41–45.
14. Исследование сопротивления усталостному разрушению биметаллов, подвергнутых импульсным воздействиям электрическими токами в переменном магнитном поле / В. Л. Володин, Ю. Д. Коньков, В. В. Гайдук, Т. В. Володин, В. Д. Сарычев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2002. – № 2. – С. 18–22.

Кузнецов Н. Н. – канд. техн. наук, доц. кафедры ОМД ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: omd@dgma.donetsk.ua