

УДК 621.7/9.044.7:669.2/8

## ВОЗМОЖНОСТЬ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Г.Н. ЗДОР, А.Г. АНИСОВИЧ, А.Г. ЯСКОВИЧ  
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)

*Рассмотрены возможности применения импульсного магнитного поля для повышения комплекса механических свойств меди и сплавов Д16, БрБ2 и Л63. Показано, что воздействие импульсного магнитного поля повышает характеристики пластичности, усталостной прочности и триботехнические показатели. Полученные результаты возможно использовать для разработки соответствующих технологий обработки сплавов цветных металлов.*

**Введение.** В настоящее время все более широкое применение находит обработка металлических материалов магнитным полем. В основном это методы упрочняющей обработки сплавов на основе железа, а также других, преимущественно ферромагнитных, материалов [1]. Большое распространение получили технологии, использующие нагрев стальных деталей и полуфабрикатов в магнитных полях с целью изменения структуры и свойств поверхностных слоев.

Имеются работы, рассматривающие теоретические предпосылки возможности изменения структуры металлов, не относящихся к группе ферромагнетиков, в магнитных полях [2]. Тем не менее исследования, в которых рассматривается обработка цветных металлов и сплавов на их основе в магнитных полях, весьма немногочисленны. Такая ситуация кажется тем более удивительной, что индукционный нагрев таких сплавов осуществляется давно как для поверхностной, так и для объемной их обработки. Такие методы рассматриваются в качестве методов термической обработки с ускоренным нагревом. Вопросы воздействия магнитного поля как такового на формирование структуры и свойств в подобных исследованиях, как правило, не рассматриваются.

Методы нетермического воздействия на структуру и свойства цветных металлов и сплавов представляют несомненный интерес как обладающие высокой технологичностью и экономичностью.

**Результаты и их обсуждение.** В данной работе продемонстрирован положительный эффект магнитно-импульсной обработки (МИО) применительно к дюралюминию Д16, меди М1, латуни Л63 и бериллиевой бронзе БрБ2.

Обработка импульсным магнитным полем проводилась в рабочей зоне цилиндрического индуктора индуктивностью  $L_n = 60$  мкГн, включенного в разрядную цепь генератора импульсных токов. В процессе обработки варьировались разрядный ток и напряжение. Схема изменения напряженности поля при обработке приведена на рис. 1.

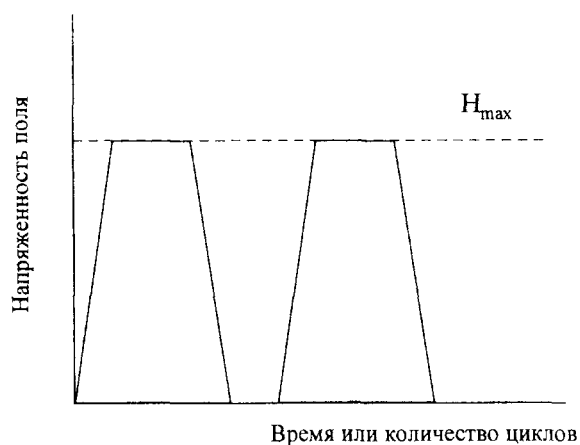


Рис 1. Схема изменения напряженности поля при магнитно-импульсной обработке

Параметрами обработки являются количество циклов, значение максимальной напряженности, время выдержки при  $H_{max}$ , частота следования импульсов.

Структурным эффектом магнитно-импульсной обработки меди и ее сплавов является повышение степени дисперсности и однородности микроструктуры [3] (рис. 2, 3). Это достигается как ростом мелких зерен исходной структуры по механизмам, аналогичным собирательной рекристаллизации, так и дроблением крупных зерен за счет возникновения нового зерна вблизи высокоугловых границ.

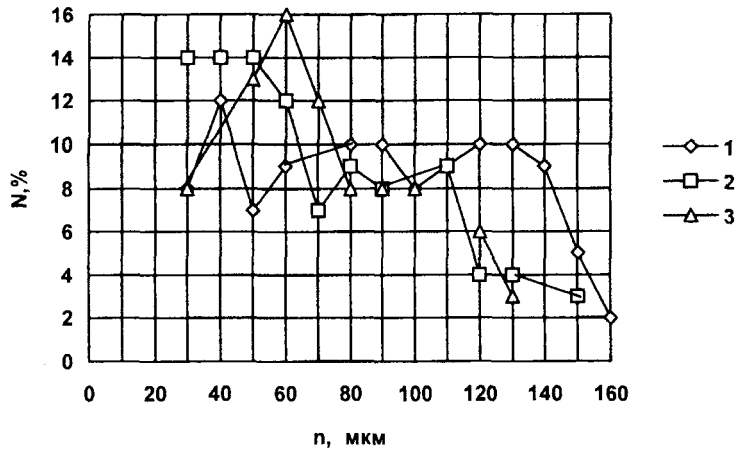


Рис 2. Распределение зерен меди по размерам после МИО:  
1 - исходный; 2 - энергия 3 кДж; 3-7 кДж

Размер зерна изменяется периодически в зависимости от количества циклов обработки [3]. Это является специфической особенностью импульсных воздействий как таковых [4].

Процесс формирования нового зерна, наблюдаемый на микроуровне, определяется изменениями, происходящими в субструктуре металла. Следует предположить, что силовое воздействие приводит к формированию активированных состояний вблизи высокоугловых границ (аналогично атомвакансионным состояниям, по терминологии [5]), релаксация которых сопровождается существенным повышением концентрации дефектов кристаллического строения. Результатом релаксации таких состояний является формирование высокоориентированных фрагментов-микрочерен при участии ротационного механизма пластичности [6].

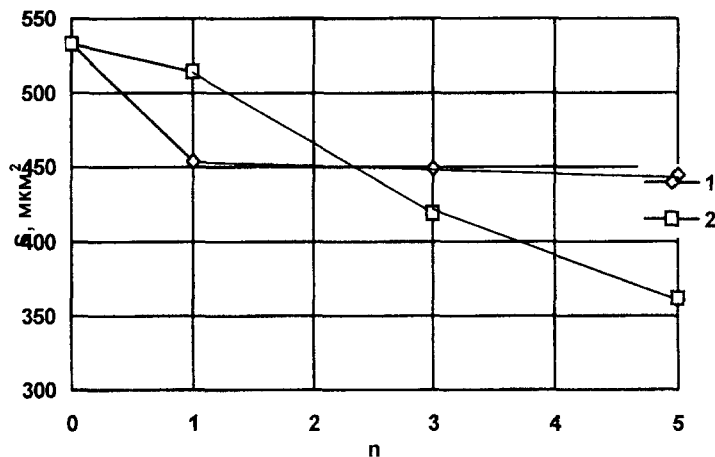


Рис 3. Изменение средней площади зерна бронзы БрБ2 после закалки и МИО в зависимости от количества циклов обработки n:  
1 – без выдержки при  $N_{\max}$ ; 2 – с выдержкой при  $N_{\max}$  5 с

Наблюдаемый эффект может быть использован для стабилизации структуры, устранения дефектов типа «крупнокристаллического ободка».

Сформировавшаяся структура обеспечивает повышение пластичности. Причиной является низкая концентрация дефектов кристаллической решетки внутри нового зерна, что облегчает формирование

новых дислокаций в приграничных участках зерен и их скольжение. Изменение пластических свойств меди и дюралюмина представлено в табл. 1.

Таблица 1

Изменение механических свойств сплавов при МИО

Сплав	Обработка (энергия импульса, кДж; напряжение заряда, кВ)	Количество циклов	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %
Д16	Исходный	-	410	8,0
	1,6	1	400	10,0
	2,8	1	420	8,5
	3,3	1	410	10,0
	4,0	1	410	9,7
М1	Исходный	-	354	8,2
	1,6	1	342	8,6
	2,8	1	345	9,2
	3,3	1	348	8,1
	4,0	1	344	9,6
	V = 1,5 кВ	1	344	10,7
		5	345	13,5
		10	351	13,0
	15	353	10,2	

Пластичность сплава Д16 повышается от 8 % в исходном состоянии до 10 % после 1 импульса МИО. Прочность практически остается на уровне исходного сплава. Исходное состояние - закалка, естественное старение и нагартовка - 7 %. Процессы достаривания сплава, укрупнения или коагуляции фаз, образовавшихся при естественном старении, в данном случае не реализуются. Более существенное повышение пластичности наблюдается для меди М1.

При обработке по схеме: закалка от 800 °С + МИО + старение при 300 °С наблюдается существенное повышение пластичности бронзы БрБ2 (табл. 2).

Изменение структуры при МИО - периодическое образование новых зерен и их рост - позволяет назвать в качестве одного из процессов структурообразования процесс, подобный рекристаллизации. Так как в исследуемом случае деформация и нагрев образцов не производились, то формирование структуры при МИО подобно формированию при классической рекристаллизации по признаку аналогии структурных эффектов.

Рекристаллизация является процессом релаксационным, она альтернативна разрушению [7]. Поэтому следует ожидать повышения долговечности металла при обработке импульсным магнитным полем.

Таблица 2

Изменение механических характеристик бронзы БрБ2 после закалки, МИО и старения при 300 °С

Обработка	Количество циклов	Время старения, ч	$\sigma_{\text{в}}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %
Закалка от 800 °С	-	0,5	114	8,1
"-	-	1	128,4	0,8
Закалка, МИО, 2 кДж	1	0,5	115,0	2,8
"-	3	0,5	118,3	5,5
"-	5	0,5	116,5	5,8
"-	1	1	122,6	3,13
"-	3	1	120,1	5,0
"-	5	1	114,1	5,1
Закалка, МИО, 5кДж	1	0,5	113,8	7,1
"-	3	0,5	110,5	7,0
"-	1	1	119,1	4,5
"-	3	1	115,9	6

Обработка образцов импульсным магнитным полем для испытаний на усталость проводилась при величине напряжения заряда емкостных накопителей системы возбуждения  $V_3 = 2$  кВ (амплитуда импульса тока  $I = 3,5$  кА), с варьированием количества импульсов. Напряженность поля  $H_m = 1,3 \cdot 10^7$  А/м, энергия, выделившаяся в зоне обработки – 4100 Дж.

При любом режиме обработки полем латуни Л63 количество циклов до полного разрушения больше, нежели для необработанных образцов. Для Д16 увеличение времени до полного разрушения наблюдается для обработки пятью импульсами (табл. 3).

Таблица 3

## Результаты испытаний на малоцикловую усталость

Д16		Л63	
количество импульсов МИО	количество циклов до полного разрушения	количество импульсов МИО	количество циклов до полного разрушения
0	120	0	115
5	195	1	327
10	91	5	321
15	124	10	345

Увеличение долговечности при циклическом нагружении с постоянной амплитудой напряжения связывается с уменьшением размера зерна [8]. На первой стадии роста усталостная трещина развивается при напряжениях ниже предела усталости. При переходе через границу зерна уровень напряжений, необходимых для роста трещины на второй стадии роста, существенно возрастает из-за различия в ориентировке соседних зерен и барьерного действия границы. На второй стадии предел усталости связан с размером зерна следующим соотношением:

$$\sigma = \sqrt[3]{\frac{c}{d}},$$

где  $d$  – размер зерна;  $c$  – постоянная.

Напряжение, необходимое для развития трещины, подчиняется соотношению:

$$\sigma^{3,6} a_c = const.$$

Если значение  $a$  равно пределу усталости, то  $a_c$  соответствует размеру зерна, т.е. предел усталости соответствует напряжению, необходимому для распространения трещины через границу зерна.

Для латуни марки 70/30 при снижении величины зерна от 131 до 1,85 мкм предел усталости увеличивается от 8,45 до 28,1 кгс/мм<sup>2</sup> соответственно; предел текучести также повышается от 1,27 до 47,7 кгс/мм<sup>2</sup>. Для алюминия при измельчении зерна от 100 до 5 мкм сопротивление малоцикловой усталости повышается в 1,5 раза [8].

Триботехнические испытания сплавов Д16 и БрБ2 проводили в течение 4 часов, фиксируя каждые 10 минут момент трения. Образцы из бериллиевой бронзы закалывали от 800 °С в воде, Д16 - от 500 °С в воде. Образцы обрабатывали на магнитно-импульсной установке МИУ-20 по 3 разряда с энергией в импульсе 3,3 кДж. Испытание на трение проводили спустя 1 сутки после обработки магнитным полем. В табл. 4 приведены линейный износ  $\Delta l$  и интенсивность изнашивания  $I$ . На рис. 4 представлены кривые изменения момента трения во времени.

Таблица 4

## Результаты триботехнических испытаний бронзы и дюралюмина

Сплав	Обработка	$\Delta l_{ср}$ , мм	$I$
БрБ2	Закалка + МИО	0,093	$6,85 \cdot 10^{-9}$
	Закалка	0,201	$14,81 \cdot 10^{-9}$
Д16	Закалка + МИО	0,495	$3,647 \cdot 10^{-8}$
	Закалка	0,565	$4,163 \cdot 10^{-8}$

Для образцов Д16Т момент трения до и после обработки практически постоянен и кривые параллельны оси времени. Износ образцов также соизмерим. Для бериллиевой бронзы наблюдается заметное влияние МИО на характеристики износа. В отсутствие обработки магнитным полем момент трения монотонно уменьшается со временем. Для образцов, обработанных МИО, в первые 30 мин испытаний момент трения ниже, чем для исходных образцов, затем наблюдается значительный рост момента трения. Через 230 мин значения момента трения становятся примерно одинаковыми. Износ образцов БрБ2, обработанных магнитным полем, примерно в 2 раза меньше, чем исходных закаленных. Повышение триботехниче-

ских показателей связано с повышением усталостной прочности, так как основной причиной выхода из строя из большинства антифрикционных материалов является усталостное разрушение [9].

Влияние структуры на повышение антифрикционных свойств сводится к формированию мелкозернистой микроструктуры, препятствующей сдвиговой деформации [10].

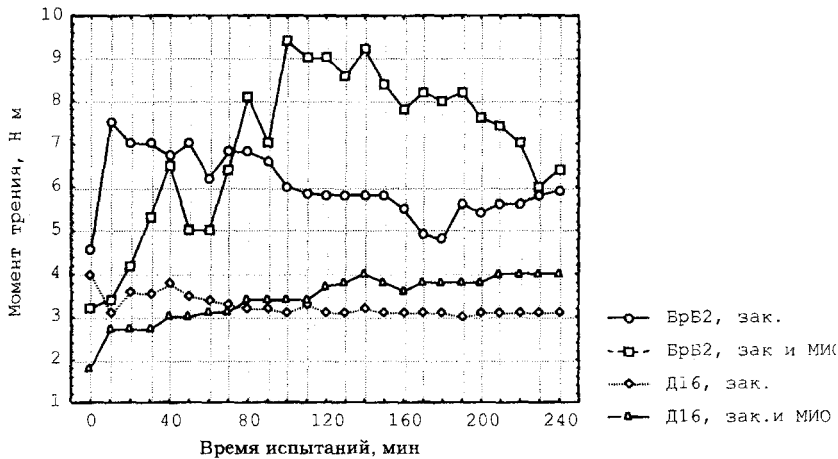


Рис. 4. Изменение момента трения БрБ2 и Д16 после обработки

### Выводы

Импульсная обработка магнитным полем может быть использована:

- для измельчения или повышения однородности микроструктуры металлов и сплавов и готовых изделий;
- повышения пластичности при сохранении уровня прочности на исходном уровне;
- повышения усталостных и триботехнических характеристик.

Весьма важным является возможность повышения механических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов в комплексе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Закалка стали в магнитном поле / М.А. Кривоглаз, В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов, Е.А. Фокина. - М.: Наука, 1977. - 120 с.
2. Постников С.Н., Сидоров В.П. О влиянии внешнего магнитного поля на дислокационные образования в твердых телах // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности, 1980. - С. 165 - 168.
3. Структурообразование в меди под воздействием импульсного магнитного поля / Г.Н. Здор, Р.Л. Тофпенец, А.Г. Анисович, И.А. Зарецкий // Изв. РАН, Сер. Физика. - 1995. -Т. 59, № 10. - С. 65 - 71.
4. Анисович А.Г., Тофпенец Р.Л. Специфика структурообразования в алюминиевых сплавах при термоциклировании // Металлы. - 2000. - № 2. - С. 73 - 78.
5. Атом-вакансионные состояния в кристаллах / В.Е. Панин, В.Н. Егорушкин, Ю.А. Хон и др. // Изв. вузов. Сер. Физика. - 1982. - № 12. - С. 5.
6. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986. - 300 с.
7. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. - М.: Металлургия, 1984. - 280 с.
8. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 456 с.
9. Шпагин А.И. Антифрикционные сплавы. - М.: Металлургиздат, 1956. - 320 с.
10. Гречин В.П. Износостойкие чугуны и сплавы. - М.: Машгиз, 1961. - 128 с.