

УДК 621.7.011

Краев М.В., Краева В.С.

## ОБОСНОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Аннотация.* Приведены результаты испытаний на растяжение и сжатие в постоянном магнитном поле индукцией до 1,1 Тл образцов стали СтЗ, 40Х, меди МЗ и дюралюминия Д16. Описано оборудование для обработки давлением в постоянном магнитном поле.

*Ключевые слова:* растяжение, сжатие, магнитное поле, прочность, пластичность, работа деформации, оборудованис.

**Введение.** Магнитное поле, с точки зрения термодинамики, является одним из внешних параметров, воздействующих на металл, – таким же, как давление и температура. Для деформации заготовок и улучшения свойств конструкционных материалов применяют магнитную обработку, которая является одним из новых направлений развития процессов обработки давлением. В результате воздействия магнитного поля улучшаются технологические параметры деформации материалов, повышаются механических свойств готовых изделий.

**Постановка проблемы.** Пределы формоизменения заготовок путем механической деформации металлов широкого сортамента изучены в достаточной степени. Значительное количество работ посвящено формированию свойств изделий в процессе деформации металлов. При холодной деформации сталей регулирование свойствами металла определяется в основном только режимами формоизменения изделий с применением промежуточной или окончательной термообработки. Ограниченность возможностей влияния на структуру и свойства при холодной деформации сталей делает актуальным применение новых источников воздействия на процесс их формоизменения.

Впервые внешнее магнитное поле нашло применение при закалке сталей [1]. Известны исследования Л.Г. Делюсто [2] по волочению стальной проволоки различных марок с применением магнитного поля индукцией 0,6-1,5 Тл. Данное исследование выявило положительное влияние даже слабого магнитного поля на противодействие созданию текстуры деформации зерен металла, чем повышался ресурс пластичности стали.

Воздействие магнитного поля на обрабатываемый металл напрямую зависит от его структуры и свойств. Наиболее явным и изученным является прямое внешнее силовое воздействие магнитного поля на ферромагнетик [3], оказывающее влияние на напряженное состояние металла при обработке. Напряжения, возникающие в металлах под действием постоянного магнитного поля, не столь значительны по своей величине и находятся в области упругих деформаций. Кроме внешнего воздействия имеет место влияние магнитного поля на движение дислокаций, на их взаимодействие со стопорами (магнитопластический эффект) [4, 5]. Здесь влияние магнитного поля рассматривается в пределах отдельных зерен металла (монокристалла). Таким образом, в зависимости от свойств металла влияние магнитного поля может быть локальным или общим, хотя в реальности строго отдельного его влияния на отдельные частицы или весь материал нет, в металле будут иметь место оба случая воздействия.

Существующие данные позволяют считать постоянное магнитное поле технологическим фактором, оказывающим влияние на деформируемость металлов в процессе их обработки давлением.

**Методика эксперимента.** Для практического использования магнитного поля в технологиях обработки давлением требуются обобщенные данные по изменению прочности и пластичности стали в процессе стандартных испытаний на растяжение и сжатие.

Для растяжения использовали образцы типа III по ГОСТ 1497-84 с диаметром рабочей части 5,0 мм и начальной расчетной длиной 32 мм, а для сжатия – образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм.

Применяемое для испытаний на растяжение в магнитном поле оборудование состоит из электромагнита и гидравлического пресса (рис. 1). Деформируют металла между сердечниками катушек [6].

Для усиления магнитного поля в зоне деформации использованы надставки из магнитомягкой стали (рис. 2).

Испытания на растяжение проводили при следующих условиях:

- без магнитного поля;
- с наложением внешнего магнитного поля индукцией  $B = 0,4$  и  $1,1$  Тл;

испытания на осадку:

- без магнитного поля;

- с наложением внешнего магнитного поля индукцией  $B = 0,3$  и  $0,6$  Тл.

Действие магнитного поля перпендикулярно направлению растяжения образцов.

Испытаниям на растяжение подвергали образцы стали марок Ст3 и 40Х в состоянии после прокатки (без ТО), а также после отжига, закалки, нормализации. Испытаниям на растяжение и сжатие подвергали образцы меди М3 и дюралюминия Д16.



Рис. 1. Установка для деформации заготовок с применением внешнего магнитного поля

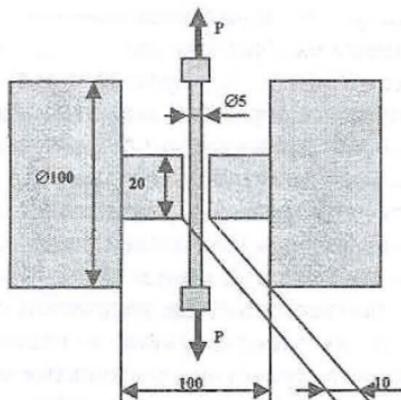


Рис. 2. Прямоугольные надставки-сердечники

**Изложение основных материалов исследования.** Испытания на растяжение стали выявили, что воздействие магнитного поля снижает уровень прочностных свойств металлов. Для отожженных образцов из стали Ст3 с увеличением силы магнитного поля снижается предел прочности сталей (до 15%). При растяжении в магнитном поле закаленных образцов имеет место снижение до 20% условного предела текучести и предела прочности стали. Кроме того, даже в слабом магнитном поле на-

блюдается резкое снижение на треть относительного удлинения образцов. Растяжение в магнитном поле образцов стали Ст3 без предварительной термообработки (т.е. в состоянии после прокатки) не выявило значимых изменений ее механических свойств.

В результате наложения магнитного поля происходит одновременное снижение предела текучести и прочности нормализованной стали 40Х. Условный предел текучести снизился на 22-26%, предел прочности – до 5%. Изменений показателей пластичности стали не наблюдалось.

Для диа- и парамагнитных материалов при испытаниях на растяжение и сжатие наблюдаются противоположные эффекты изменения напряжения течения в магнитном поле. Для диамагнитной меди в условиях одноосного растяжения наблюдается снижение напряжения течения, а смена напряженного состояния на всестороннее сжатие повышает напряжение течения. Испытание на растяжение меди показало снижение предела прочности металла на 8%, а испытание на осадку – повышение силы деформации на 5-12%. Для парамагнитного дюралюминия в условиях одноосного растяжения изменений прочности не наблюдается, при всестороннем сжатии напряжение течения снижается. Испытания на растяжение дюралюминия показали снижение относительного удлинения на 13%, а на осадку – понижение силы деформации на 5-20%.

Изменение деформирующего напряжения в магнитном поле является функцией, зависящей от силы магнитного поля. Зависимость между деформирующим напряжением в постоянном магнитном поле  $\sigma_{sm}$  и напряжением в исходном состоянии  $\sigma_s$  представлена в виде одномерной полиномиальной регрессии:

$$\frac{\sigma_{sm}}{\sigma_s} = a_0 + a_1 B + a_2 B^2, \quad (1)$$

где переменной является индукция магнитного поля  $B$ . Значения коэффициентов уравнения (1) приведены в таблице 1.

Использование слабого магнитного поля индукцией до 1 Тл не может оказать существенного влияния на напряженное состояние металла в очаге деформации. Даже из ориентировочных технических расчетов [7] следует, что силовое воздействие магнитного поля на металл стального образца не превышает 100 Н, что составляет только 5-10% от максимального усилия растяжения образцов. Влияние магнитного поля наиболее значимо в период упругой деформации металла при сопоставимых значениях усилий растяжения образца и его притяжения магнитным полем. Поэтому из наблюдаемых эффектов наиболее явно снижается предел текучести стали, а соответственно, уменьшается угол наклона линейного

участка диаграммы растяжения. Для немагнитных меди и дюралюминия силовое воздействие магнитного поля столь мало [3], что им можно пренебречь. Полученные эффекты изменения прочности доказывают, что для всех испытанных материалов воздействие магнитного поля в значительной степени происходит на микроструктурном уровне, более подробно описанном авторами [4 и 5].

Таблица 1

Коэффициенты уравнения (1)

Марка материала	$a_0$	$a_1, 1/Тл$	$a_2, 1/Тл^2$
при растяжении			
Ст3 отжиг	1	0,035	0,031
Ст3 закалка	1	-0,490	0,270
Ст3 без ТО	1	-0,141	0,098
40X нормализ	1	-0,890	0,626
М3	1	-0,1069	0,0354
Д16	—	—	—
при сжатии			
М3	1	0,3962	-0,4426
Д16	1	-0,5701	0,6370

Учитывая, что энергия деформации при растяжении не растрчивается на нагрев образцов и трение, наиболее вероятно, что энергия магнитного поля расходуется на эволюцию дефектной структуры металла при пластической деформации. Влияние поглощенной энергии магнитного поля на деформацию образцов оценено по изменению работы, затрачиваемой на их растяжение. Работа деформации определена как площадь диаграммы растяжения в осях усилие–абсолютное удлинение. Изменение удельной работы деформации в магнитном поле  $A_m$  относительно удельной работы растяжения образца без магнитного поля  $A$  приведено на рис. 3.

Определение эффективности использования магнитного поля при обработке металлов давлением может быть оценено по изменению запаса пластичности металла. В качестве показателя пластичности выбрано соотношение пределов текучести и прочности металлов (рис. 4).

Магнитное поле оказало влияние на запас пластичности отожженной стали Ст3 и нормализованной стали 40X. Причем у стали Ст3 запас пластичности снизился, а у стали 40X – увеличился. Изменение исследуемого показателя у сталей не превышало 18%. Запас пластичности меди снизился на 9%, а дюралюминия увеличился на 5%.

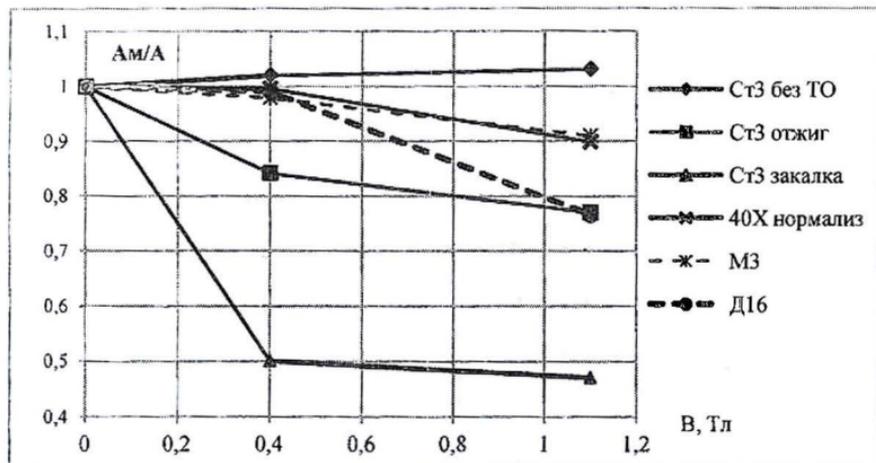


Рис. 3. Изменение удельной работы деформации при растяжении в магнитном поле

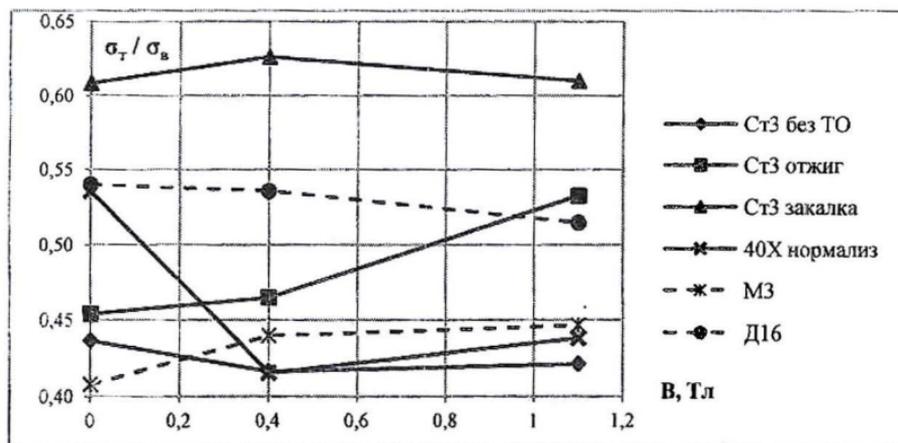


Рис. 4. Изменение запаса пластичности при растяжении в магнитном поле

Использование магнитного поля в процессе обработки давлением требует установки дополнительного оборудования в зоне деформации заготовок. Оборудование состоит из электромагнита (один из примеров приведен на рис. 1) с металлическим сердечником. Форма сердечника, его размеры могут быть подобраны в зависимости от расположения и формы деформирующего инструмента. Сила магнитного поля в зоне деформации находится в прямой зависимости от величины зазора между сердечниками. Деформирующий инструмент (например: матрица штампа, волока, контейнер для прессования) чаще всего выполняется из

магнитопроводящих сталей и может служить продолжением сердечника электромагнита. Для осуществления этого требуется обеспечить контакт между сердечником и деформирующим инструментом, также как между сердечником и надставками (см. рис. 2). Надставку сердечника электромагнита возможно выполнить сплошной с отверстием для размещения деформирующего инструмента (рис. 5).

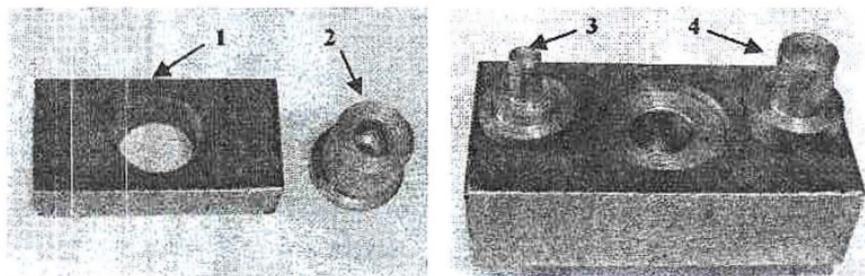


Рис. 5. Инструмент для осадки с использованием магнитного поля: 1 – надставка; 2 – матрица; 3 – выталкиватель; 4 – пуансон

Для увеличения силы магнитного поля между надставками выполняется зазор (подобно рис. 2) из немагнитного материала с достаточной магнитной проницаемостью (воздух, немагнитная вставка). При производстве однотипных деталей сердечник (надставка) является универсальным, а замене подлежит только вставка-деформирующий инструмент.

#### Выводы

1. Внешнее постоянное магнитное поле влияет на деформацию металлов с различной структурой и магнитными свойствами. Основное влияние магнитного поля индукцией до 1,1 Тл в процессе растяжения образцов проявляется в снижении до 25% значений предела текучести и предела прочности металлов.

2. Магнитное поле может приводить также и к снижению пластичности стали. Снижение на треть относительного удлинения металла выявлено у термически упрочненной стали. У дюралюминия выявлено снижение относительного удлинения на 13% без изменения показателей прочности.

3. Влияние магнитного поля зависит от вида напряженного состояния металла в процессе деформации. В случае испытаний диа- и парамагнитных материалов при переходе от растягивающих к сжимающим напряжениям наблюдаются противоположные эффекты изменения напряжения течения металла в магнитном поле.

4. Снижение прочности и (или) пластичности приводит к снижению удельной работы деформации металла.

5. Воздействие магнитного поля может изменять запас пластичности стали как в сторону снижения, так и в сторону его повышения.

6. Для создания магнитного поля в очаге деформации металлов может быть использовано универсальное оборудование со сменным рабочим инструментом.

### Список литературы

1. Закалка стали в магнитном поле / М.А.Кривоглаз, В.Д.Садовский, Л.В.Смирнов, Е.А.Фокина. М.: Наука, 1977. 119 с.

2. Делосто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.

3. Тамм И.Е. Основы теории электричества: учеб пособие для вузов. 11-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.

4. Альшиц В.И. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. № 5. С. 826-854.

5. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел (обзор) // Физика твердого тела. 2004. №5. С. 769-803.

6. Подготовка экспериментального исследования штамповки с применением слабого магнитного поля / М.В.Краев, В.С.Краева, В.А.Гринкевич, Т.Н.Шевченко // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА, 2012. №4 (33). С. 122-125.

7. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1972. 248 с.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### RATIONALE AND PROSPECTS OF THE COMBINED METAL FORMING USING A CONSTANT MAGNETIC FIELD

*Abstract.* Shows the results of tensile and compressing samples of steel Cr3, 40X, copper M3 and duralumin D16 in a static magnetic field to 1,1 T induction. Described equipment for forming in constant magnetic field.

*Keywords:* tension, compression, magnetic field, strength, plasticity, deformation work, equipment.