

УДК 621.73

Краев М. В.
Гринкевич В. А.
Шевченко Т. Н.
Краева В. С.

КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ СТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Интенсивное развитие способов штамповки как обособленного вида обработки металлов завершилось в конце 20-го века. Изучены возможности формоизменения металла в операциях штамповки, известен достигаемый уровень свойств металла после деформации. Современные тенденции совершенствования производства направлены в большей степени на достижение максимальной эффективности существующих процессов обработки давлением, созданием способов обработки металлов на основе комбинированной обработки стали и сплавов [1, 2]. Для ряда штампованных изделий на первое место выдвигается проблема достигаемых деформацией механических и др. физических свойств стали [3]. Решать комплексную задачу «деформация – свойства» наиболее эффективно путем применения внешних воздействий на металл до, во время или после деформации.

Важной отличительной характеристикой металла являются его магнитные свойства. Путем взаимодействия металла с магнитным полем в металлургии и машиностроении разработан ряд технологий его обработки.

Действие внешнего магнитного поля оказывается значительным, если в превращении участвуют фазы, различающиеся по намагниченности. Так, в случае деформационного мартенситного превращения парамагнитный аустенит превращается в ферромагнитный мартенсит [1].

Аустенитные коррозионностойкие стали характеризуются большой пластичностью и вязкостью, низкой твердостью, низким пределом пропорциональности и текучести. Единственным методом повышения прочности этих сталей является холодная пластическая деформация. Упрочнение данных сталей происходит из-за их сильной наклепываемости (вследствие преобладания в структуре стали аустенита), а также превращения некоторого количества аустенита в мартенсит [3].

Весьма важно также то обстоятельство, что с помощью магнитного поля можно регулировать интенсивность развития мартенситного превращения и получать на одной и той же нестабильной аустенитной стали различное сочетание прочностных и пластических свойств [2].

Целью статьи является рассмотрение особенностей применения внешнего магнитного поля в процессах ОМД, в частности при листовой штамповке.

Магнитное поле, с точки зрения термодинамики, является одним из внешних параметров, воздействующих на металл – таким же, как давление и температура. При его воздействии фазовое состояние стали может изменяться.

Воздействие магнитного поля на материал может быть импульсным или постоянным. Для получения ощутимых эффектов желательно проводить исследования в достаточно сильных магнитных полях, получение которых сопровождается определенными технологическими трудностями и требует специальных установок. Установки импульсного намагничивания позволяют кратковременно, на доли секунды, создавать поля высокой напряженности до 32 МА/м (400 кЭ). Постоянные магнитные поля обладают меньшей напряженностью до 16 МА/м (140 кЭ), но позволяют длительное время подвергать материал воздействию поля.

Воздействие магнитного поля на сталь будет во многом зависеть от ее исходного фазового состояния. В аустенитных сталях, обладающих парамагнитными свойствами, магнитное поле оказывает иницирующее действие на мартенситное превращение. Появление или увеличение в структуре сплавов количества мартенсита приводит к изменению физических и в том числе механических свойств материала. Основное количество работ по изучению

деформационного превращения направлена в первую очередь на улучшение механических свойств сталей и сплавов. Реализация полученных данных может быть использована при разработке методов комбинированного упрочнения материалов для получения высокопрочных сталей с пределом прочности 2500–3000 МПа [1]. Комбинированная обработка стали включает в себя термическую обработку, обработку давлением и воздействие на материал внешнего магнитного поля. Именно комбинированной обработкой возможно достижение максимального эффекта упрочнения стали. Разработаны многие методы комбинированной обработки стали, существенно повышающие их механические свойства.

Магнитное поле представляет интерес не только для процессов, происходящих при термической обработке стали. В частности при обработке давлением метастабильных сталей эффекты самозакалки или пластичности наведенной превращением могут интенсифицироваться наложением внешнего магнитного поля.

В реальных процессах штамповки [3] проведены эксперименты по определению влияния внешнего магнитного поля на повышение прочностных свойств трубчатых изделий. Исследовался процесс раздачи (увеличения диаметра) трубчатых заготовок коническим пуансоном. Штамповались заготовки из стали 12X18H10T диаметром 15 и 24 мм с толщиной стенки 0,5 и 0,3 мм соответственно. Деформирование осуществлялось при комнатной температуре. Степень деформации заготовок составляла 15–20 %. Прочностные свойства отштампованных деталей, учитывая их малую толщину и форму, возможно оценить только измерением микротвердости. Микротвердость стали после деформации без применения внешнего магнитного поля составила 3000–3800 МПа. В процессе штамповки в очаге деформации с помощью электромагнита создавалось постоянное магнитное поле напряженностью до 1,1 МА/м (10 кЭ). Особенностью действия постоянного магнитного поля является возможность поддерживать определенную величину напряженности магнитного поля в течение всего периода деформации. При действии внешнего магнитного поля достигнуто дополнительное увеличение прочности стали отштампованных деталей на 5–15 % в зависимости от условий деформации [3].

Пустовойт В. Н. [2], рассматривая влияния внешнего магнитного поля на изменение условий фазовых равновесий, механизм и кинетику превращений при термической обработке стали, сделал определенные выводы о характере такого влияния. Во-первых, имеет место энергетическое влияние магнитного поля, обусловленное разницей намагниченностей исходных фаз и продуктов превращения. Существенную роль здесь играет напряженность поля, с увеличением которого возрастают и термодинамические эффекты, в частности, изменение равновесной температуры фазовых переходов. Значительные сдвиги температур равновесия могут иметь место только в очень сильных полях, напряженностью свыше 8,0 МА/м. Воздействие таким и большим по напряженности полем может быть осуществлено преимущественно в импульсном режиме, так как проблема использования сверхпроводящих соленоидов постоянного поля далеко не решена, тем более для условий промышленной эксплуатации. В сверхсильных импульсных полях возможно осуществление местного упрочнения сталей аустенитного класса путем инициирования магнитным импульсом процесса образования мартенсита в поверхностных слоях детали. Магнито-импульсную обработку применяют для изменения фазового состава, например изменения соотношения между количествами мартенсита и остаточного аустенита (взамен обработки холодом). В постоянных полях напряженностью порядка 2 МА/м, которые реально могут быть получены в электромагнитах промышленного типа, изменения условий фазовых равновесий невелики, и этими изменениями нельзя в полной степени объяснить трансформацию структуры, фазового состава и свойств стали, наблюдаемых экспериментально при использовании таких полей.

Во-вторых, воздействие магнитным полем в процессе фазовых превращений при термической обработке приводит к усилению процессов своеобразного магнитного расщепления неферромагнитной матрицы (аустенита), обусловленного образованием ансамбля ферромагнитно-упорядоченных кластеров, которые, воспринимая энергию внешнего поля через

магнитоstrictionные напряжения, изменяют поля упругих сил в микрообъемах атомной решетки матрицы, что приводит к снижению энергии образования зародышевого центра ферромагнитной фазы (продукта реакции) критического размера. Увеличение по этой причине с.з.ц. (мультипликативное зарождение) определяет особую каталитическую роль магнитного поля в развитии фазовых реакций, продукты которых являются ферромагнетиками (матрица неферромагнитна). Эти явления отмечаются в полях напряженностью порядка 0,4 МА/м и усиливаются по мере увеличения напряженности. В полях напряженностью 1,2–1,6 МА/м рассматриваемые эффекты настолько существенны, что оказывают заметное влияние на результаты термической обработки.

В-третьих, влияние магнитного поля проявляется в изменении кинетики превращений, что вызвано, с одной стороны, снижением термодинамического потенциала ферромагнитной фазы, а с другой – локальным приростом свободной энергии исходной неферромагнитной фазы в микрообъемах с ближним спиновым порядком. При неизменном переохлаждении (перенагреве) это дает выигрыш в движущей силе перехода и реализуется в увеличении темпа фазового превращения. Последнее, как показано в работе, приводит к стабильным изменениям структуры и свойств стали, полезным для эксплуатации. Эти полезные с технико-экономической точки зрения изменения могут быть достигнуты при использовании постоянного магнитного поля напряженностью 1–2 МА/м, которое относительно несложно может быть получено в промышленных установках [2].

В сталях, основной структурной составляющей которых является ферромагнитная фаза (феррит с перлитом или мартенситом), магнитное поле создает дополнительные объемные напряжения при их обработке. Использование данного воздействия для создания более равномерного плоского или объемного напряженного состояния позволяет предотвращать образование вытянутых зерен в структуре стали (образование текстуры), а значит способствовать повышению пластичности стали. По результатам исследований [4] по прокатке сталей типа 08Ю, их пластичность повышается на 10–15 % в магнитном поле с индукцией в 500 мТл. Даже при наложении внешнего магнитного поля с индукцией меньшей в 2–2,5 раза в опытах по растяжению образцов стали Ст.3 без выраженного увеличения пластичности стали происходит измельчение ферромагнитного зерна, при этом его пропорции размеров в соответствующих зонах образцов позволяют иметь зернам менее выраженный (по сравнению с зернами после растяжения без магнитного поля) вытянутый вид [5].

Среди известных способов применения магнитного поля для деформации металла наибольшее распространение получила магнитно-импульсная штамповка. Очевидные преимущества магнитно-импульсных технологий в штамповочном производстве обусловлены эффектом гиперпластичности металлов. Суть эффекта заключается в следующем: при действии кратковременных импульсных нагрузок относительные деформации металлических образцов могут достигать до 200 %. С практической точки зрения этот эффект интересен тем, что новые легкие и достаточно жесткие сплавы алюминия с разными добавками, появившиеся в современном автомобилестроении, не обладают достаточной пластичностью [6]. Схема установки для получения импульсных магнитных полей показана на рис. 1. Принцип работ установки заключается в зарядке конденсатора C от источника тока через трансформатор Tr и выпрямитель B . С помощью разрядника P при достижении заданного уровня энергии осуществляется мгновенная разрядка конденсаторов на рабочий индуктор L . Основной характеристикой установки является величина запасаемой в конденсаторе энергии.

При деформации металла может дополнительно применяться не только магнитное поле, но и его совместное действие с электрическим током. В работе [7] обнаружено, что приложении электрического тока и совместного приложения магнитного поля и электрического тока оказывает положительное влияние на поведение Zn–Al–Cu сплава при механических испытаниях. Заметно снижается предел упругости поликристалла (примерно в 40 раз), увеличивается продолжительность стадии легкого скольжения.

Предварительные опыты [2] термомеханико-магнитной обработки на стали 50X2H22 при комнатной температуре показали, что пластическая деформация на 70 % приводит к повышению предела прочности с 690 до 1360 МПа, а предел текучести от 350 до 1240 МПа. Последующее охлаждение образцов до $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ само по себе не вызывает изменения механических свойств стали, поскольку имеет место очень сильная стабилизация структуры аустенита. Однако совмещение охлаждения в жидком азоте с импульсным намагничиванием ведет к развитию мартенситного превращения, и после воздействия полем напряженностью 420 кЭ в стали 50X2H22 происходит повышение предела прочности до 1780 МПа, а предела текучести до 1400 МПа; при этом относительное удлинение $\delta \sim 12\%$, относительное сжатие $\psi \sim 35\%$. Нужно отметить, что в пластически деформированном аустените после обработки в магнитном поле появляется всего около 25 % мартенсита.

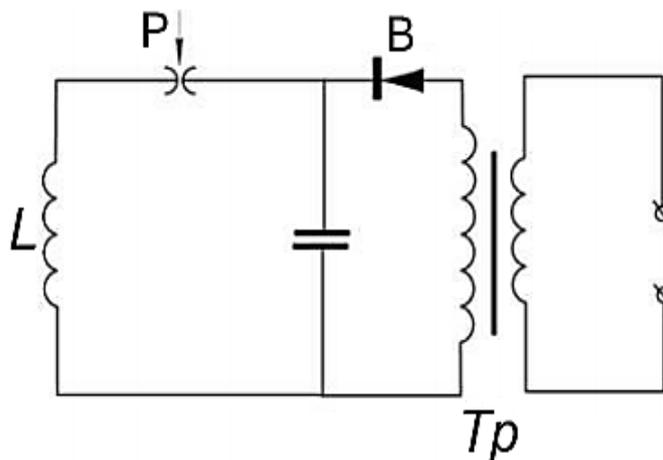


Рис. 1. Принципиальная схема установки для магнитно-импульсной обработки металлов

В практическом отношении дестабилизирующее влияние магнитного поля можно рассматривать как способ повышения прочности стали за счет увеличения в структуре количества аустенита.

Магнитным полем можно смещать температуры структурных фазовых переходов и влиять на морфологию мартенситной фазы. Разница в намагниченности аустенита и мартенсита определяет величину смещения температуры фазового перехода в магнитном поле [2].

На кафедре ОМД НМетАУ проводятся исследования влияния постоянного внешнего магнитного поля на деформацию сталей. Внешний вид установки для испытаний приведен на рис. 2.



Рис. 2. Установка для деформации заготовок с применением внешнего магнитного поля

Некоторые результаты исследования описаны выше. Представленная установка позволяет создать магнитное поле с индукцией до 200 мТл. Определено, что для достижения ощутимого влияния поля требуется иметь установку, позволяющую варьировать магнитным полем с индукцией до 2 Тл. Создаются новые более мощные магнитные катушки для установки.

ВЫВОДЫ

Магнитное поле является технологическим фактором, применяемым для обработки металлов с целью дополнительного упрочнения сталей или достижения их высокой деформируемости.

Действие магнитного поля на материал заготовки основано на взаимодействии с полем ферромагнитных фаз стали. При этом в метастабильных сталях с аустенитной парамагнитной структурой интенсифицируется деформационное мартенситное превращение, а в сталях со структурой на основе ферромагнитного феррита в очаге деформации изменяется напряженное состояние.

Воздействие внешнего магнитного поля постоянной напряженности в операциях штамповки мало изучено. Существующие установки позволяют в лабораторных условиях исследовать влияние на процесс деформации сталей постоянного магнитного поля малой и средней напряженности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки / Гринкевич В. А., Кухарь В. В., Краев М. В., Бурко В. А. – Мариуполь : ЗАО «Газета «Приазовский рабочий», 2011. – 336 с.
2. Счастливец В. М. Мартенситное превращение в магнитном поле / В. М. Счастливец, Ю. В. Калетина, Е. А. Фокина. – Екатеринбург : УрО РАН, 2007. – 322 с.
3. Краев М. В. Перспективы совершенствования технологических процессов листовой штамповки многофазных сталей / М. В. Краев, В. А. Гринкевич, В. С. Краева // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2010. – № 60. – С. 191–193. – (Серія «Машинобудування»).
4. Делюсто Л. Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях / Л. Г. Делюсто. – М. : Машиностроение, 2005. – 272 с.
5. Применение внешнего магнитного поля при холодной деформации сталей / М. В. Краев, В. А. Гринкевич, В. С. Краева, В. Ю. Щетинин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 7. – С. 53–55.
6. Особенности магнитно-импульсной обработки металлов в технологиях современности / [Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатюк, Щ. В. Гнатюкова и др.] // *Электротехника и электромеханика*. – 2011. – № 1. – С. 72–75.
7. Велиханов А. Р. О влиянии электрического тока и магнитного поля на физикомеханические свойства сплава Zn–Al–Cu / А. Р. Велиханов // *Физика металлов и металловедение*. – 2010. – Т. 109, № 6. – С. 690–693.

Краев М. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;

Гринкевич В. А. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;

Шевченко Т. Н. – аспирант НМетАУ;

Краева В. С. – канд. физ.-мат. наук, доц. ДНУЖТ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

ДНУЖТ – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск.

E-mail: bstn@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2012 г.