

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ МЕТАЛЛОКОРДА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

О. Ю. Ходосовская¹, А. М. Милюкова², О. А. Толкачева², А. Н. Матяс²

¹ ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»
(г. Жлобин, Республика Беларусь),

² Физико-технический институт НАН Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

Рассмотрена возможность применения магнитно-импульсной обработки (МИО) для повышения качественных характеристик сварного шва с учетом положительного опыта ее применения для других видов продукции. Вопрос актуален в связи с тем, что существует проблема вероятности обрыва металлокорда в области сварного шва при переработке у потребителя. С целью отладки технологических режимов МИО образцы были обработаны в цилиндрическом индукторе при экспериментальных комбинированных режимах на магнитно-импульсных установках (МИУ). Приведены результаты исследований влияния импульсного магнитного поля на структурно-фазовые превращения и прочностные характеристики сварного шва металлокорда и заготовки, сравнительных динамических испытаний образцов на растяжение, измерения микротвердости, исследования микроструктуры образцов сварных швов до и после МИО. По результатам исследований разработана технология инновационной упрочняющей МИО сварных швов металлокорда и заготовки.

Ключевые слова: металлокорд, заготовка стали 80К, сварной шов, магнитно-импульсная обработка, предел прочности, временное сопротивление разрыву, микротвердость, микроструктура.

Для создания конкурентоспособной продукции необходимо применение материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, в том числе прочностными, и физических методов, позволяющих улучшать характеристики уже используемых материалов. Одним из возможных способов достижения поставленной цели может стать применение магнитно-импульсной обработки материалов (МИО). При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, становится более однородной структура

металла [1], что приводит к улучшению эксплуатационных свойств изделий. Эти процессы непосредственно связаны с неоднородностью стали, присутствием пара- и ферромагнитных фаз, мгновенным локальным выделением теплоты вблизи границ зерен при протекании индукционных токов, деформационными и магнитострикционными (в случае изделий, выполненных из магнитных материалов) эффектами [2, 3].

МИО представляет собой способ обработки металлов, который возможен в магнитно-импульсных установках (МИУ) при преобразовании электрической энергии в механическую в обрабатываемом токопроводящем изделии. Условия пластической деформации при импульсных воздействиях на материалы существенно отличаются от условий статического деформирования из-за кратковременности и периодичности силового воздействия, а также разнообразия механизмов релаксации суммарных внутренних напряжений [4]. Для МИО используются магнитно-импульсные установки (рис. 2) со специальным индуктором (плоским или цилиндрическим) [5], в который помещается металлическое изделие.

Сущность МИО заключается в том, что в момент разряда конденсаторной батареи ток, проходящий по виткам индуктора, создает магнитное поле, которое вызывает возникновение вихревых индукционных токов в изделии. Магнитное поле индукционного тока направлено таким образом, чтобы уменьшить изменение магнитного потока, создаваемого током индуктора. В результате возникает разность плотностей энергии магнитного поля внутри изделия и вблизи поверхности [2, 3]. Основные преимущества магнитно-импульсной обработки по сравнению с известными методами поверхностного упрочнения: неизменя-

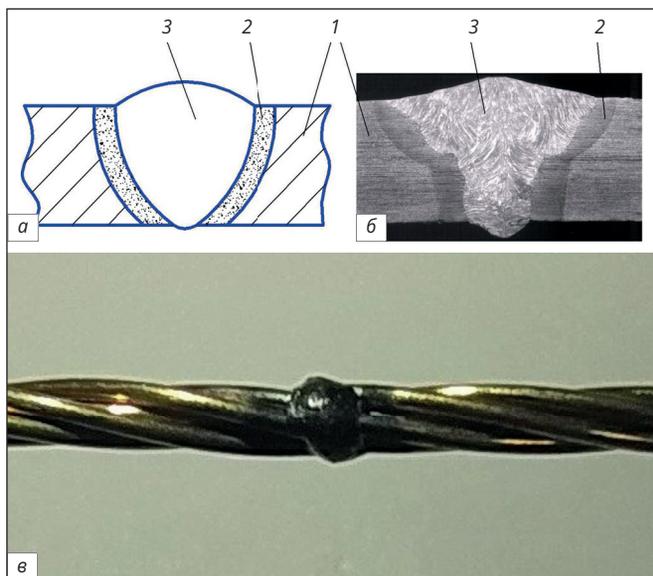


Рис. 1. Схема строения (а) и макрошлиф (б) сварного соединения, где 1 – основной металл; 2 – переходная зона; 3 – сварной шов; фото образца металлокорда конструкции 1 + 5x0,40НТ со сварным швом (в)



Рис. 2. Установка МИП-18 с запасаемой энергией 15 кДж

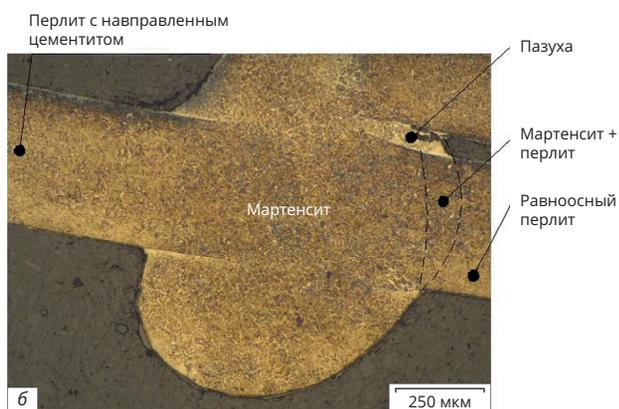
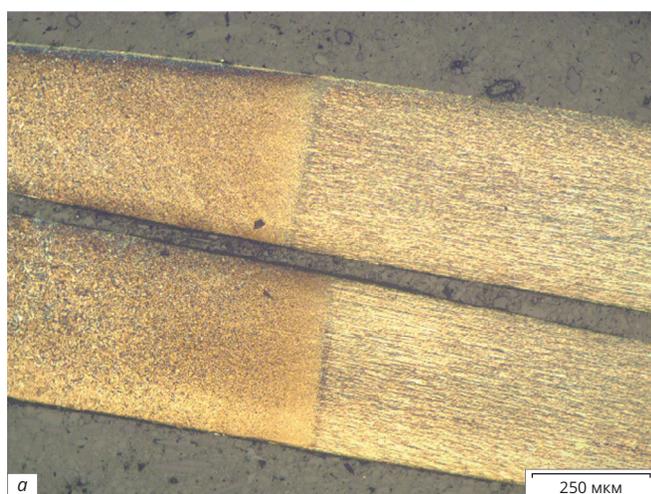


Рис. 3. Микроструктура в сварном шве образца металлокорда до МИО: а – микроструктура двух проволок металлокорда с качественным швом, б – схема микроструктуры некачественного сварного шва

емость геометрических размеров, улучшение качества поверхности упрочненных изделий; простота технологии и оснастки; высокая производительность; отсутствие необходимости дополнительных материалов и обработки; низкое энергопотребление; экологическая безопасность.

Учитывая возможности данного вида упрочнения поверхности и наличие положительного опыта применения для других видов продукции (стального инструмента) [6 – 9], актуальным стал вопрос использования МИО для повышения качественных характеристик сварных швов металлокорда и заготовки из стали 80К, поскольку существует проблема вероятности обрыва по сварному шву при использовании металлокорда у потребителя при изготовлении шин автомобилей.

Оборудование, материалы и методика проведения исследований. Подавляющее количество металлических конструкций получают методом сварки. За длительный период применения подобной технологии было разработано несколько ее разновидностей, некоторые характеризуются высокой эффективностью, другие подходят для работы с труднообрабатываемыми материалами. Стыковое соединение свариваемых деталей применяется, когда утолщение металла исключено или не приемлемо. Такое соединение применяют в авиакосмической и автомобильной промышленности для образования неразъемного соединения деталей металлических конструкций в том случае, когда поверхности деталей лежат в одной плоскости и примыкают друг к другу своими торцами.

На рис. 1 представлены схема стыкового сварного соединения (а), типовой макрошлиф сварного шва (б) и образец металлокорда конструкции 1 + 5×0,40НТ со сварным швом, подготовленного для испытаний (в).

Как известно, наружный слой 1 основного металла почти полностью обезуглерожен. Структура полностью обезуглероженной зоны представляет собой чистый феррит. В сварном соединении состояние металла отличается от исходного, поскольку в нем присутствует обезуглероженный слой, меняются структура и механические свойства. Это связано с тем, что в зоне сварного шва образуется утолщение, которое чем больше площадь сечения, тем хуже прогревается, особенно в витых конструкциях металлокорда, сваренных электроконтактной сваркой.

Прочность сварного соединения и его эксплуатационные свойства во многом зависят от структурных изменений, которые происходят в переходной зоне 2. Мартенсит отпуска более прочный, чем зернистый цементит, который образуется в переходной зоне, и соответственно, сама область оплавления получается более прочной, чем структура переходной зоны. Кроме того, на качество сварного соединения образца оказывает влияние способ его выполнения. Поэтому образцы для испытаний должны быть подготовлены одним оператором.

Для осуществления МИО в ФТИ НАН Беларуси разработаны и изготовлены магнитно-импульсные установки (МИУ-2, МИУ-3, МИП-18) с различными

Результаты проведения испытаний на растяжение

Режим	Среднее временное сопротивление разрыву, кН	Среднее временное сопротивление разрыву контрольного образца, кН	Процент упрочнения, %
1. МИУ-3: 6 кДж, 4 импульса	$(0,96 + 0,92)/2 = 0,94$	1,008-1,016 (сред. 1,012)	-5,2
2. МИУ-3: 6 кДж, 4 импульса (предварительный нагрев перед каждым импульсом до 300 °С по 2 мин)	1,1	1,008-1,016 (сред. 1,012)	8,7
3. МИП-18: 6 кДж, 4 импульса в концентраторе + МИУ-3: 6кДж, 6 имп. в приспособлении с натягом	1,184	1,008-1,016 (сред. 1,012)	15,6
4. МИУ-3: 6 кДж, 5 импульсов	1,90	1,808	5,1
5. МИУ-3: 6 кДж, 6 импульсов	2,02	1,808	11,7
6. МИУ-3: 6 кДж, 5 импульсов (предварительный нагрев до 500 °С)	1,18	1,008-1,016 (сред. 1,012)	16,6

технологическими возможностями, предназначенные для упрочнения металлических изделий сильным импульсным электромагнитным полем [7 – 9]. Магнитно-импульсная установка МИП-18, представленная на рис. 2, имеет максимально запасаемую энергию 15 кДж. МИП-18 позволяет увеличить эффективность магнитного воздействия на тугоплавкие материалы и обрабатывать инструмент больших размеров за счет увеличенного рабочего стола.

С целью исследования возможности влияния импульсного магнитного поля на структурно-фазовые превращения и прочностные характеристики сварного шва металлокорда в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (далее БМЗ) были изготовлены образцы металлокорда конструкции 1 + 5×0,40НТ и заготовки диаметром 2,2 мм из стали 80К со сварными швами и без них (далее образцы).

После обработки образцы исследовали с помощью инвертированного металлографического микроскопа отраженного света «Olympus» с цифровой системой изображений в продольных микрошлифах. Было проведено травление реактивом «Nital» и фотографирование поверхности образцов в исходном состоянии и после МИО. На разрывных машинах WDW-100E в ФТИ и БМЗ испытывали на растяжение контрольные необработанные и опытные образцы после МИО при различных режимах.

Известно, что модификация структуры стального образца при МИО происходит только в поверхностном слое, глубина воздействия в зависимости от химического состава обрабатываемого материала, режима МИО и расстояния до рабочей спирали индуктора составляет от 10 до 300 мкм. В ФТИ в процессе отладки технологических режимов МИО образцы были обработаны в цилиндрическом индукторе с внутренним диаметром 10 мм при десяти экспериментальных комбинированных режимах на двух магнитно-импульсных установках МИУ-3 и МИП-18 с различными частотами воздействия при энергии 6 кДж разной длительности (количестве импульсов).

Результаты исследований и их обсуждение. После предварительной МИО нескольких образцов металлокорда (рис. 1, в) проводили сравнительные испытания на растяжение по стандартной методике (ГОСТ 10446–80 (ИСО 6892–84)). Разрыв образцов происходил вне зоны сварного шва. По их результатам (увеличению или уменьшению временного сопротивления разрыву) проводили корректировку режима МИО (длительности и энергии воздействия магнитным полем) следующих образцов.

В таблице представлены результаты проведения испытаний на растяжение: режимы МИО, среднее временное сопротивление разрыву контрольных и опытных образцов до и после МИО при некоторых режимах; процент упрочнения рассчитан как процент изменения полученного сопротивления разрыву по сравнению с контрольным образцом. Из таблицы видно, что при режиме 6 кДж, 4 импульса произошло разупрочнение образцов на 3-5 %, что может свидетельствовать о наличии хрупкого слоя в области переходной зоны сварного шва, вызванного повышенной твердостью и особенностями структуры сварного шва. Когда образец со сварным швом дважды подвергался МИО: сначала в высокочастотной установке МИП-18 с применением медного концентратора магнитного поля, который повышает эффективность МИО, а затем на низкочастотной установке МИУ-3 в приспособлении с натягом металлокорда за счет большего поступления тепловой энергии и увеличения степени деформации, степень упрочнения образца увеличилась до 15,6 %.

Увеличение количества импульсов от 5 до 6 привело к упрочнению образцов на 5 и 11 %, соответственно. МИО образца металлокорда с предварительным нагревом позволила повысить прочность до 16,6 %. Следовательно, предварительный нагрев сварного шва металлокорда перед МИО при выбранном режиме позволил получить наиболее высокий процент повышения прочности при испытаниях на растяжение. Исходя из полученных данных, МИО образцов для испытаний на БМЗ проводили на режимах, показавших

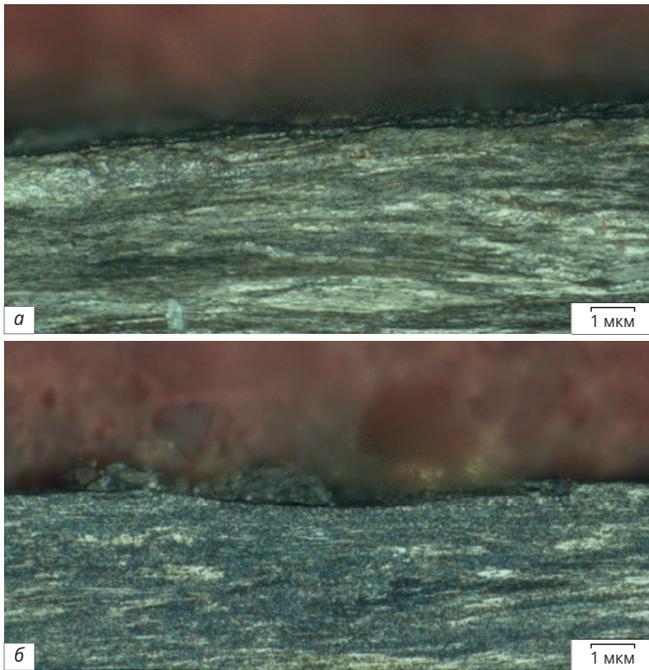


Рис. 4. Микроструктура образца металлокорда конструкции 1+5x0,40НТ (x1000): *а* – исходное состояние; *б* – после обработки

лучшие результаты увеличения временного сопротивления разрыву 15-16,6 %. Результаты сравнительных испытаний образцов на БМЗ, упрочненных по разработанной в ФТИ технологии МИО, показали повышение временного сопротивления разрыву образцов без сварного шва и образцов со сварным швом, по сравнению с необработанными образцами.

Измерение микротвердости по глубине образцов показало, что в зоне сварного шва микротвердость имеет максимальную величину, а при переходе через переходную зону заметно снижается. Применение МИО привело к увеличению значения данного параметра в зоне сварного шва и переходной зоне.

Проведен металлографический анализ исходных образцов металлокорда и заготовки из стали 80К и после МИО. На рис. 3 приведена микроструктура образцов металлокорда и заготовки из стали 80К. На рис. 3, *а* структура перлита с обеих сторон имеет направленность вдоль длины проволоки, характерную для ее волочения, в области сварного шва видна переходная зона со структурой зернистого цементита. На рис. 3, *б* показан некачественный шов со структурой мартенсита в зоне сварки, мартенсита с перлитом в переходной зоне. В области переходной зоны имеется непровар, который может стать причиной разрыва.

На рис. 4 показана микроструктура образца металлокорда конструкции 1 + 5x0,40НТ (x1000) в исходном состоянии (*а*) и после МИО (*б*). Видно, что образец имеет вытянутую текстурированную структуру, которая образовалась при волочении, после МИО она стабилизировалась и выглядит более плотной и равномерной.

На рис. 5 показана микроструктура образцов заготовки диаметром 2,2 мм из стали 80К у поверхности

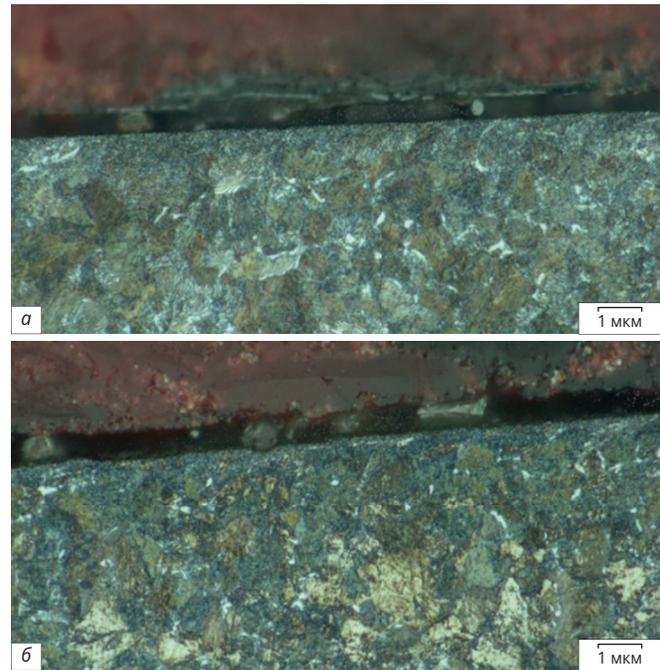


Рис. 5. Микроструктура образца заготовки: *а* – исходное состояние; *б* – после МИО

(x1000) в исходном состоянии (*а*) и после МИО (*б*). Структура образцов заготовки имеет перлитно-ферритный характер с преобладанием перлитной составляющей. После МИО светлые зерна перлита (выпуклые) стали более яркими.

Дальнейшие исследования микроструктуры и свойств позволят разработать более совершенную технологическую оснастку для малых диаметров металлокорда и технологию упрочняющей МИО для дальнейшего повышения эксплуатационных характеристик сварных швов металлокорда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы прочностные характеристики металлокорда и заготовки из стали 80К в зависимости от технологических режимов магнитно-импульсной обработки. Результаты сравнительных испытаний показали повышение предела прочности образцов металлокорда и заготовки без сварного шва и со сварным швом до 16,6 % после магнитно-импульсной обработки. Измерение микротвердости по глубине образцов показало, что в зоне сварного шва микротвердость имеет максимальную величину, а при переходе через переходную зону заметно снижается. Применение МИО привело к увеличению значения данного параметра в области сварного шва и переходной зоны. Металлографический анализ микроструктуры исходных образцов металлокорда и заготовки из стали 80К и после МИО показал, что структура имеет ярко выраженную текстуру волочения, которая после обработки уплотнилась. По результатам проведенных исследований рекомендовано продолжить дальнейшие исследования для разработки технологии упрочняющей МИО с целью дальнейшего повышения эксплуатационных

характеристик сварных швов металлокорда и заготовки стали 80К.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Алифанов А. В., Акулов А. В., Попова Ж. А.** и др. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий // *Материалы 9-й Междунар. практ. конф. «Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки»*, 10 – 13 апреля 2007 г. – СПб. : Издательство политехнического университета, 2007. В 2-х ч. Ч. 1. С. 16 – 21.
2. **Алифанов А. В., Ционенко Д. А., Милокова А. М.** Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса // *Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича.* – Витебск : ВГТУ, 2017. Гл. 13. С. 31 – 52.
3. **Алифанов А. В., Ционенко Д. А., Милокова А. М., Ционенко Н. М.** Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии // *Вестні Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук.* 2016. № 4. С. 31 – 36.
4. **Анисович А. Г.** Особенности релаксационного процесса в металлах при импульсных воздействиях // *Вестні Нац. акад. навук Беларусі. Серія фізіка-тэхнічных навук.* 2015. № 1. С. 16 – 21.
5. **Алифанов А. В., Лях А. А., Милокова А. М.** и др. Индуктор для магнитно-импульсной обработки : пат. на полезную модель № 10603 U РБ от 30.04.2015 МПК (2006.01) С 21D 10/00, В 23P 15/00; заявитель «Физико-технический институт НАН Беларуси». Заявка № 420140290 от 07.08.2014 // *Нац. Центр інтэлектуал. уласнасці. Афіц. бюл.* 2015. № 2. С. 125.
6. **Алифанов А. В., Акулов А. В., Попова Ж. А., Демячик А. С.** Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей // *Литье и металлургия.* 2012. № 3 (66). С. 77 – 82.
7. **Алифанов А. В., Ционенко Д. А., Милокова А. М.** и др. Особенности магнитно-импульсной упрочняющей обработки стальных цилиндрических изделий переменного сечения // *Литье и металлургия.* 2017. Вып. 2 (87). С. 66 – 75.
8. **Милокова А. М., Горчанин А. И., Матяс А. Н., Малеронок В. В.** Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлорежущих сверл из быстрорежущей стали // *Вестник БарГУ. Серия Технические науки.* 2018. Вып. 9. С. 50 – 56.
9. **Горчанин А. И., Милокова А. М., Лях А. А.** Повышение эффективности упрочняющей магнитно-импульсной обработки ножей со сложным профилем лезвия // *Вестник БарГУ. Серия Технические науки.* 2019. Вып. 7. С. 43 – 48.

Статья поступила 08.04.2022