

Исследование остаточных напряжений в сварных соединениях жаропрочного магниевого сплава МЛ10 после электродинамической обработки

Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. В. Савицкий, О. Л. Миходуй

Институт электросварки им. Б. Е. Патона НАН Украины, Киев, Украина

При ремонте авиационных конструкций из магниевого сплава МЛ10 используется аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. При этом в ремонтных швах возникают остаточные сварочные напряжения, являющиеся одной из причин снижения эксплуатационных характеристик восстановленных изделий. Наличие остаточных напряжений обуславливает необходимость проведения послесварочной термообработки, что повышает себестоимость ремонтных мероприятий. Это приводит к поиску альтернативных методов регулирования напряженного состояния сварных соединений, один из которых – электродинамическая обработка, позволяющая снизить уровень остаточных напряжений в ремонтных швах и, как следствие, себестоимость ремонтной сварки при восстановлении авиационных конструкций из указанного сплава. По результатам проведенных экспериментов установлено, что электродинамическая обработка позволяет снизить начальный уровень напряжений в сварных соединениях, достигающий 120 МПа, до 30 МПа, а при определенных геометрических характеристиках образцов формировать в зоне обработки поля сжимающих напряжений, значения которых равны – 50 МПа. Показано, что оптимальное расстояние между зонами обработки, составляющее 5 мм, обеспечивает гарантированное перекрытие зон электродинамических воздействий и, как следствие, максимальную эффективность электродинамической обработки.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, магниевый сплав, сварочные напряжения, ремонтная сварка, корпус авиадвигателя.

При ремонте повреждений в корпусных авиационных конструкциях из магниевых сплавов [1–3] используется аргонодуговая сварка неплавящимся электродом [4]. Одной из причин снижения эксплуатационных характеристик восстановленных корпусов является наличие остаточных сварочных напряжений в ремонтных швах, что приводит к понижению ресурса летательных аппаратов. В связи с этим возникает необходимость проведения послесварочной термообработки конструкций в крупногабаритных электропечах, что связано со значительными энергетическими затратами и повышением себестоимости ремонтных мероприятий. При этом нет полной гарантии от появления усталостных трещин в ремонтных швах, что приводит к необходимости разработки и применения альтернативных методов снижения уровня остаточных напряжений в сварных соединениях. К таким методам относятся также методы обработки импульсными электрическими и магнитными полями [5–8].

Одним из способов воздействия импульсного тока на металлы является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на инициировании в материале электродинамических сил, возникающих при прохождении в обрабатываемом материале разряда тока [9]. Применение ЭДО снижает уровень остаточных напряжений в ремонтных швах [4], что в ряде случаев может являться альтернативой термообработке, а в перспективе и заменить ее. Это позволит уменьшить себестоимость ремонтных технологий при восстановлении элементов авиационных конструкций.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния электродинамической обработки на снижение уровня остаточных напряжений в сварных соединениях из магниевого сплава МЛ10.

Учитывая, что сварка применяется при ремонте повреждений в авиационных конструкциях, для оценки влияния ЭДО на остаточные напряжения использовали

образцы, вырезанные из цилиндрической оболочки диаметром 1,5 м промежуточного корпуса авиационного двигателя Д-36 [4], изготовленной из жаропрочного магниевого сплава МЛ10.

Использовали два типа образцов (рис. 1), геометрические характеристики которых соответствовали размерам ремонтных сварных соединений конструктивных элементов промежуточного корпуса. Образец первого типа представлял собой фрагмент цилиндрической оболочки с гладкой поверхностью размером $330 \times 200 \times 8$ мм и стрелой продольного прогиба 20 мм (рис. 1,а). На образце второго типа размером $330 \times 260 \times 8$ мм и стрелой 20 мм находятся два цилиндрических усиления под крепежные элементы промежуточного корпуса диаметром 25 мм и высотой 15 мм, расстояние между которыми составляет 60 мм (рис. 1,б).



а



б

Рис. 1. Образцы ремонтных сварных соединений из сплава МЛ10: а – образец первого типа; б – образец второго типа без сварного шва; в – образец второго типа со сварным швом.

На образцах первого типа выполняли сварные швы, аналогичные используемым при ремонте промежуточного корпуса, затем их подвергали ЭДО с текущим контролем значений остаточных напряжений после сварки и обработки.

Кроме того, на образцы наносили надрезы, имитирующие характерные повреждения промежуточного корпуса [4], которые впоследствии устраняли с помощью

аргонодуговой сварки. Так, перед выполнением сварного шва в центральной части образца ручной фрезой производили надрез размером $200 \times 2 \times 4$ мм с последующей разделкой. По надрезанному участку с помощью ручной аргонодуговой сварки выполняли двухпроходный шов.

На образцах второго типа между цилиндрическими усилениями выполняли надрез размером $40 \times 2 \times 4$ мм, разделку, а также ручную сварку неплавящимся электродом в среде аргона, которую проводили по технологии, изложенной ранее [4]. Внешний вид ремонтного сварного соединения на образце второго типа показан на рис. 1, в.

Напряженное состояние образцов сварных соединений оценивали бесконтактным методом электронной спекл-интерферометрии. При этом метод основывался на измерении перемещений при упругой разгрузке объема металла в исследуемых точках на поверхности образца в результате сверления несквозных отверстий диаметром и глубиной 1,0 мм [10]. Применяли аппаратный комплекс (рис. 2), в котором исследуемый участок закрепленного на сборочной плите образца освещали лучом лазера, входящего в состав оптического интерферометра, под одним и тем же углом (57°) с двух направлений, и таким образом определяли компоненты вектора перемещений в плоскости. Данные измерений перемещений после сварки и ЭДО регистрировали и обрабатывали с помощью специализированных блоков, входящих в состав комплекса. Метод обеспечивал целостность образца в процессе регистрации его напряженного состояния после сварки и ЭДО.

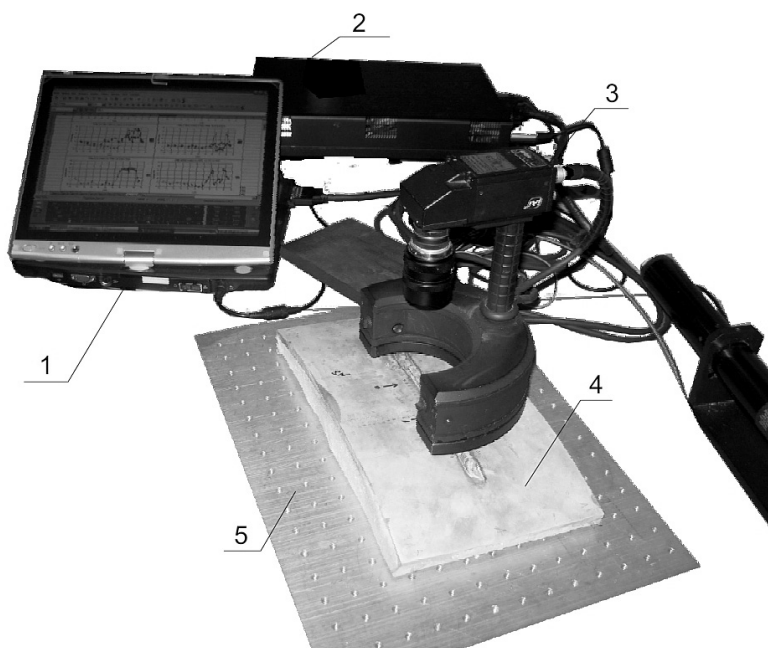


Рис. 2. Общий вид аппаратного комплекса для регистрации напряженного состояния образцов сплава МЛ10 методом спекл-интерферометрии: 1 – блок регистрации сигнала; 2 – блок обработки оптического сигнала; 3 – оптический интерферометр; 4 – образец; 5 – сборочная плита.

После сварки и ЭДО оценивали изменение напряженного состояния сварных соединений в окрестности ремонтных швов. По результатам сравнения значений напряжений до и после обработки определяли эффективность процесса ЭДО.

После сварки и регистрации начального уровня напряжений сварные соединения образцов подвергали ЭДО по режиму, соответствующему значению энергии

разряда емкостного накопителя не выше 800 Дж. Задавали следующие параметры импульсного токового разряда: зарядное напряжение 500 В, емкость накопителя 6600 мкФ. При этом направление действия импульсного тока при ЭДО совпадало с продольной осью ремонтного сварного шва.

Схемы ЭДО и измерения перемещений на поверхности исследуемых образцов представлены на рис. 3.

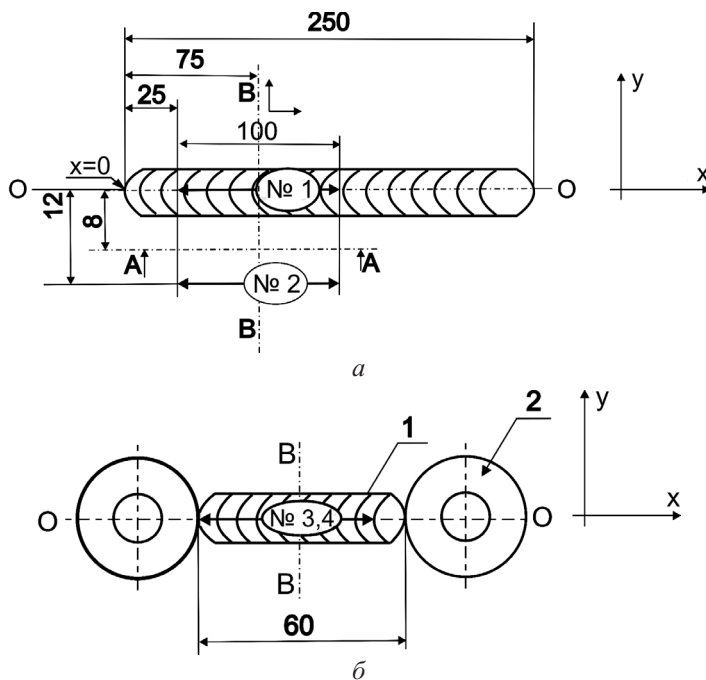


Рис. 3. Схемы ЭДО и измеряемых зон на образцах из сплава МЛ10: *a* – образец первого типа (рис. 1,*a*), *A–A*, *B–B* – линии измерений, № 1, 2 – последовательность ЭДО ($x = 0$ – точка начала измерения значений σ_x); *б* – цилиндрическое усиление, № 3, 4 – последовательность ЭДО; 1 – сварной шов; 2 – усиление под крепежный элемент. (Стрелками обозначено направление ЭДО в сварном шве.)

На рис. 4 показано распределение продольной компоненты напряжений σ_x после сварки и ЭДО на образце первого типа (рис. 1,*a*). На первом этапе исследований перемещения измеряли на наружной поверхности образца вдоль линии *A–A*, расположенной на расстоянии 8 мм от центра шва (рис. 3,*a*). Измерения проводили после сварки и ЭДО № 1, выполненной по линии шва (рис. 3,*a*). Видно, что до ЭДО растягивающие напряжения σ_x распределяются вдоль линии шва, а их средние значения составляют 120 МПа (на рис. 4,*a* кривая 1), после обработки характер распределения σ_x существенно не изменился, но их средние значения уменьшились до 70 МПа (на рис. 4,*a* кривая 2).

Распределение напряжений σ_x на наружной поверхности образца первого типа после сварки вдоль линии *B–B*, перпендикулярной линии шва (рис. 3,*a*), представлено на рис. 4,*б* (кривая 1). Неуравновешенность эпюры σ_x связана со значительной изгибной составляющей напряжений на поверхности образца, вызванной его исходной кривизной, а также тем, что значения σ_x измеряли только на наружной поверхности металла. При этом максимальное значение растягивающих напряжений σ_x в измеряемом сечении достигает предела текучести $\sigma_{0,2} = 120$ МПа на расстоянии 10 мм от центра шва.

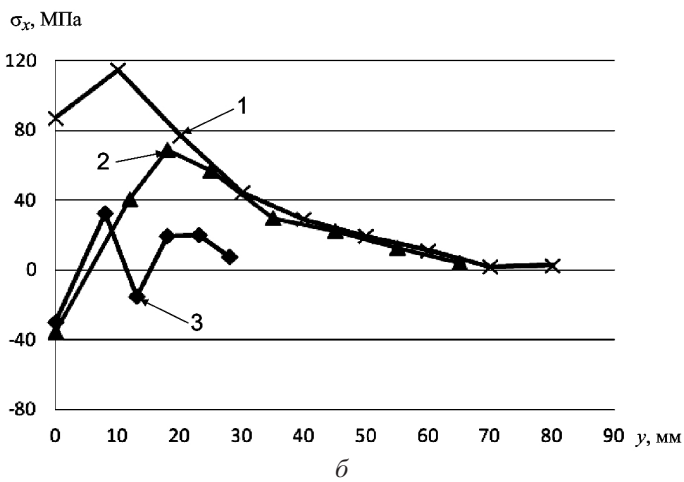
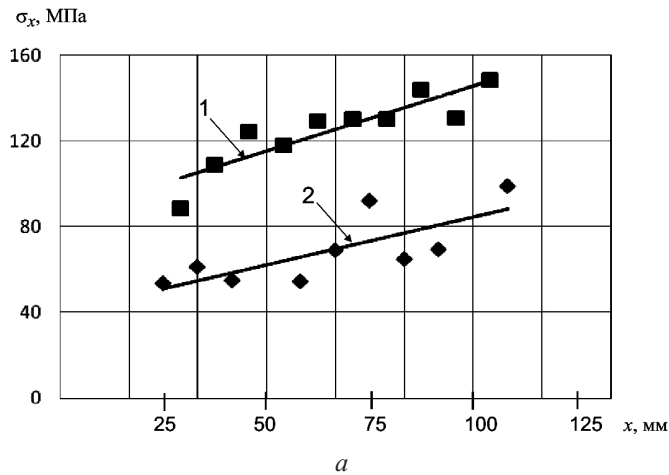


Рис. 4. Влияние ЭДО на распределение σ_x в образце первого типа из сплава МЛ10: *a* – 1 – вдоль линии *A–A* (рис. 3,*a*) после сварки; 2 – вдоль линии *A–A* после ЭДО № 1, значение $x = 0$ соответствует точке начала шва на рис. 3,*a*; *b* – 1 – после сварки вдоль линии *B–B*; 2 – после ЭДО № 1; 3 – после ЭДО № 1 и 2.

Влияние электродинамических воздействий после ЭДО № 1 на напряженное состояние сварного соединения подтверждает распределение σ_x вдоль линии *B–B* (на рис. 4 кривые 2).

Из рис. 4,*б* видно, что на обработанном участке центра шва распределение σ_x изменило напряжения от растягивающих к сжимающим, значения которых достигли -40 МПа. На участках поверхности, соответствующих максимальным значениям напряжений $\sigma_x = 120$ МПа, после ЭДО № 1 наблюдалось уменьшение напряжений до 30 МПа, что составляет 25% значений до обработки. Итак, можно отметить, что следствием ЭДО является уменьшение значений напряжений с переходом их от растягивающих к сжимающим в зоне обработки.

Для исследования влияния последовательной ЭДО центра шва и околошовной зоны на изменение значений σ_x использовали образцы первого типа. С этой целью проводили ЭДО № 2 на поверхности образца вдоль линии *A–A* на расстоянии 12 мм от центра шва (рис. 3,*a*). Распределение σ_x вдоль линии *B–B* (рис. 3,*a*) после ЭДО № 2 представлено на рис. 4,*б*. В этом случае формируется область сжимающих напря-

жений, локализованная на участке электродинамических воздействий, где значения σ_x понижаются до -20 МПа (на рис. 4,б кривая 3), в то время как в центре шва они не изменяются (-40 МПа). Локализованный характер σ_x в зоне ЭДО № 2 близок к наблюдаемому после ЭДО № 1 в центре шва. Как видно из распределения напряжений σ_x (на рис. 4,б кривая 3), при расстоянии между участками ЭДО № 1 и 2, равном 12 мм, в равноудаленной зоне (на расстоянии 6 мм от центра шва) они уменьшаются до 60 МПа, что составляет только 50% их значения после сварки (перед выполнением ЭДО № 1 и 2). Это подтверждает локализованный характер электродинамических воздействий.

Исследовали влияние ЭДО на распределение остаточных сварочных напряжений между усилениями на образце второго типа (рис. 1,б). Изучали изменения σ_x на поверхности образца вдоль линии В-В, перпендикулярной линии шва после обработки за два (ЭДО № 3) и пять (ЭДО № 4) проходов вдоль линии шва (рис. 3,б). После регистрации изменения напряжений в результате ЭДО № 3 на поверхности шва выполняли еще три прохода (ЭДО № 4) по режиму, аналогичному ЭДО № 1. Распределение напряжений σ_x после ЭДО сварного шва на образце второго типа представлено на рис. 5. Видно, что, как и на образце первого типа, максимальные значения σ_x после сварки (на рис. 5 кривая 1) не превышают 120 МПа. После ЭДО № 3 напряжения σ_x уменьшились на 75% (до 30 МПа) – на рис. 5 кривая 2, а после ЭДО № 4 – на 85% (до 20 МПа) – на рис. 5 кривая 3.

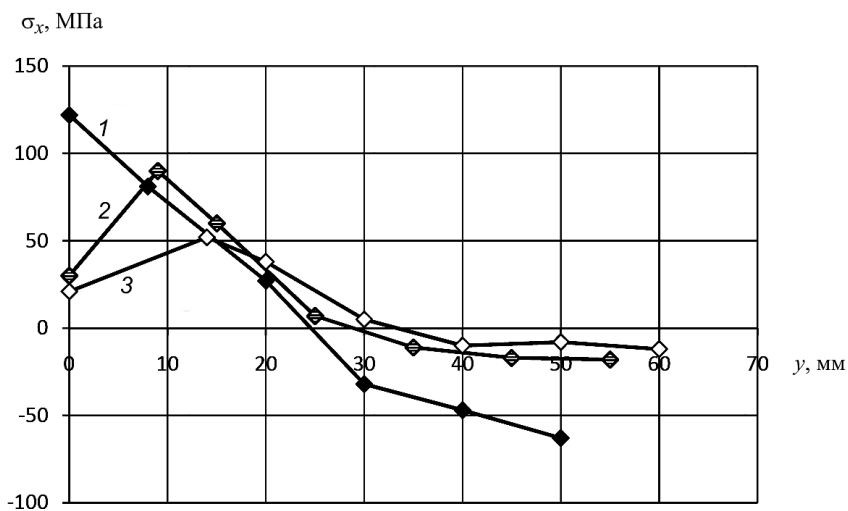


Рис. 5. Влияние ЭДО на распределение σ_x в образце второго типа из сплава МЛ10 (рис. 1,б): 1 – после сварки вдоль линии В-В (рис. 3,б); 2, 3 – после ЭДО № 3 и 4 соответственно.

При этом знак напряжений σ_x не изменился, в отличие от их распределения на образцах первого типа. Различия в характере распределения σ_x после ЭДО, полученные на образцах первого и второго типов, связаны с геометрическими особенностями последнего. Увеличение толщины образцов в зонах усиления может понижать эффективность ЭДО [11].

Анализ представленных на рис. 4,б эпюр σ_x показывает, что электродинамические воздействия являются весьма локализованными в зоне влияния. Следовательно, задача по определению оптимального расстояния между участками электродинамических воздействий – “шага” ЭДО, обеспечивающего гарантированное перекрытие обработанных участков с минимальным уровнем остаточных сварочных напряжений, достаточно актуальна.

С целью определения оптимального шага при заданных электрических параметрах ЭДО выполняли обработку металла шва на образце первого типа. Электродинамическую обработку № 1 сварного шва проводили с изменением расстояния L между участками электродинамического воздействия, определяя при этом значения напряжений после сварки σ_0 и относительное изменение напряжений после ЭДО δ :

$$\delta = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ – уменьшение значения напряжения σ_0 в результате ЭДО.

Величину $\Delta\sigma$ измеряли по линии шва на расстоянии между зонами ЭДО, равном $L/2$, а эффективность ЭДО определяли из отношения (1). Максимальное расстояние между зонами ЭДО принимали равным 20 мм, уменьшая его до 5 мм с целью определения зависимости $\delta = f(L)$ – рис. 6. Анализ данных, приведенных на рис. 6, показывает, что при $L \geq 20$ мм эффективность ЭДО крайне мала. Это свидетельствует об отсутствии перекрытия зон электродинамического воздействия при уровне энергии импульса до 800 Дж. При $L = 15, 12$ и 8 мм значения δ достигают соответственно 10, 21 и 38%, что говорит о частичном перекрытии зон ЭДО. Гарантированное перекрытие зон электродинамического воздействия имеет место при величине L , равной не более 5 мм.

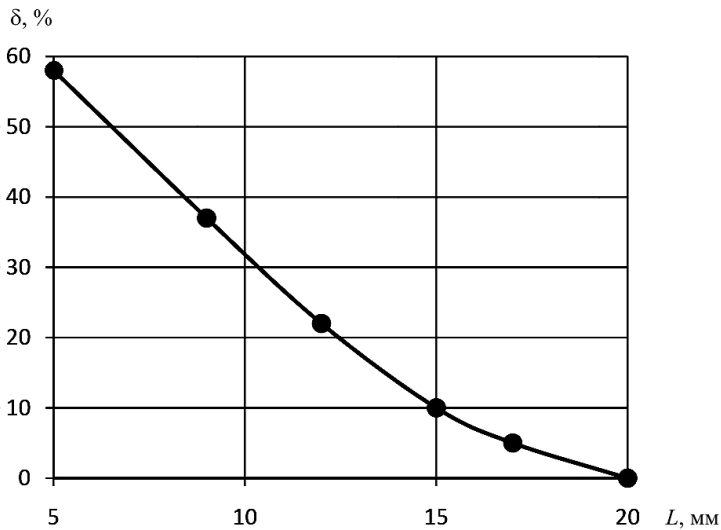


Рис. 6. Влияние расстояния L между зонами ЭДО на относительную эффективность обработки δ .

Таким образом, при заданных энергетических параметрах электродинамических воздействий ЭДО сплава МЛ10 целесообразно проводить с шагом, не превышающим 5 мм.

Представленные результаты исследований показывают, что с помощью ЭДО можно регулировать уровень остаточных напряжений на поверхности сварных соединений из сплава МЛ10. После ЭДО остаточные сварочные напряжения значительно снижаются. Электродинамические воздействия могут положительно влиять на характеристики усталостной прочности сварных соединений из магниевого сплава МЛ10 при циклических нагрузках, что позволит повысить эксплуатационный ресурс авиационных конструкций [4].

Выводы

1. Разработана экспериментальная методика оценки влияния электродинамической обработки на снижение уровня остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях из жаропрочного магниевого сплава МЛ10.

2. Установлено, что с помощью ЭДО можно понижать исходные значения остаточных напряжений растяжения в сварных соединениях из сплава МЛ10 практически до нуля.

3. Показано, что при электрических параметрах ЭДО, соответствующих значению накопленной энергии разряда импульсного тока 800 Дж, обработку сварных соединений сплава МЛ10 целесообразно проводить при расстоянии между зонами воздействий, не превышающем 5 мм.

Резюме

При ремонті авіаційних конструкцій з магнієвого сплаву МЛ10 використовується аргонодугове зварювання неплавким електродом. При цьому в ремонтних швах виникають залишкові зварювальні напруження, які є однією з причин зниження експлуатаційних характеристик відновлених виробів. Наявність залишкових напружень зумовлює необхідність проведення післязварювальної термообробки, що підвищує собівартість ремонтних заходів. Це приводить до пошуку альтернативних методів регулювання напруженого стану зварних з'єднань, одним з яких є електродинамічна обробка, що дозволяє понизити рівень залишкових напружень у ремонтних швах і, як наслідок, собівартість ремонтного зварювання при відновленні авіаційних конструкцій з магнієвого сплаву. За результатами виконаних експериментів встановлено, що електродинамічна обробка дозволяє знижувати початковий рівень напружень у зварних швах, що дорівнює 120 МПа, до 30 МПа, а за певних геометричних характеристик зразків формувати в зоні обробки поля стискальних напружень, значення яких сягають –50 МПа. Показано, що оптимальна відстань між зонами обробки становить 5 мм, що забезпечує гарантоване перекриття зон електродинамічних впливів і, як наслідок, максимальну ефективність електродинамічної обробки.

1. *Альтман М. Б., Белов А. Ф., Добаткин В. И. и др.* Магниеиые сплавы. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – Ч. 2. – 294 с.
2. *Шаломеев В. А.* Жаропрочный магнийевый сплав МЛ10 со скандием // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 15 – 19.
3. *Пат. № 25055 Україна.* Литейный сплав на основе магния / В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко, П. Д. Жеманюк и др. – Опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.
4. *Лобанов Л. М., Пацин Н. А., Черкашин А. В. и др.* Ремонтная сварка промежуточных корпусов из жаропрочного магниевого сплава МЛ10 с применением электродинамической обработки // Автомат. сварка. – 2012. – № 11. – С. 31 – 36.
5. *Антонов Ю. А., Рагозин Ю. И.* Импульсный метод снятия остаточных напряжений // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – № 3. – С. 91 – 95.
6. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И.* Моделирование релаксации напряжений при действии импульсного электрического тока высокой плотности // Пробл. прочности. – 2007. – № 2. – С. 113 – 120.
7. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А.* Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности // Там же. – 2004. – № 4. – С. 60 – 67.

8. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Значковский О. Я.* Сопротивление деформированию конструкционных сплавов при воздействии импульса электрического тока и криогенных температур // Там же. – 1985. – № 5. – С. 105 – 107.
9. *Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Логинов В. П.* Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 // Автомат. сварка. – 2007. – № 6. – С. 11 – 13.
10. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И.* Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // Там же. – 2006. – № 1. – С. 10 – 13.
11. *Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Миходуй О. Л.* Эффективность электродинамической обработки сварных соединений сплава АМг6 различной толщины // Там же. – 2012. – № 3. – С. 12 – 16.

Поступила 26. 03. 2014