

Влияние величины осадки на формирование сварного соединения при линейной сварке трением

Каравеева М.В.^{1,†}, Киселева С.К.¹, Бычков В.М.¹, Медведев А.Ю.¹, Супов А.В.²,
Мусин Ф.Ф.¹, Александров И.В.¹, Латыш В.В.¹

[†]karma11@mail.ru

¹ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет,
ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа, 450000

²ОАО Уфимское моторостроительное производственное объединение, ул. Ферина, 2, г.Уфа, 450039

Effect of the shortening on formation welding under linear friction welding

M.V. Karavaeva¹, S.K. Kiseleva¹, V.M. Bychkov¹, A.Yu. Medvedev¹, A.V. Supov²,
F.F. Musin¹, I.V. Alexandrov¹, V.V. Latysh¹

¹Ufa state aviation technical university, K. Marx str., 12, 450000, Ufa

²Ufa engine industrial corporation, Ferina str., 2, 450039, Ufa

Исследовали влияние величины осадки при линейной сварке трением на микроструктуру в зоне сварного соединения двухфазных титановых сплавов VT6 и VT8M-1. Показано, что величина осадки при линейной сварке трением определяет качество сварного соединения. Линейная сварка трением с величиной осевой осадки 0,4 мм не обеспечивает получения качественного сварного соединения, в результате чего при испытании на растяжении происходит разрушение по месту стыка. При осевой осадке 1,4 мм и более разрушение происходит по основному металлу.

Ключевые слова: титановый сплав, линейная сварка трением, микроструктура.

The effect of the shortening under linear friction welding on the microstructure in the welding zone of the two-phase titanium alloys VT6 and VT8M-1 was investigated. It was found that shortening under linear friction welding determines the quality of welded joints. Linear friction welding with shortening of 0.4 mm does not provide quality of the welded joint, resulting in the failure in the joint place under a tensile test. For the compression value of 1.4 mm and more, a failure occurs in the base metal.

Keywords: titanium alloy, linear friction welding, microstructure.

1. Введение

Сварка трением является эффективным технологическим процессом позволяющим соединять различные металлические материалы в твердом состоянии с помощью выделения тепла при их относительном движении. Этот процесс, разработанный в основном для соединения тел вращения, стал приобретать большую популярность вследствие развития другой своей разновидности - линейной сварки трением (ЛСТ). Значительный интерес к ЛСТ вызван возможностью соединять детали, форма которых отлична от тел вращения, что является весьма актуальной проблемой, например, в авиационном двигателестроении.

Процесс образования неразъемного соединения при ЛСТ можно условно разделить на 4 стадии [1,2]. Начальная стадия заключается в том, что под действием осевой нагрузки соединяемые поверхности вступают в контакт. На второй стадии под действием сил трения между заготовками происходит выделение тепла в зоне контакта, благодаря чему происходит пластификация тонких слоев материала, прилегающих к линии стыка.

Третья стадия характеризуется тем, что пластифицированные слои под действием осевой нагрузки выдавливаются из стыка, образуя так называемый «грат». Вместе с гратом выдавливаются различные неметаллические включения и загрязнения поверхности металла, образуя ювенильные поверхности. В результате этого на

четвертой стадии при увеличенном осевом усилии и отсутствии трения происходит образование межатомных связей и формирование неразъемного сварного соединения.

Осевое усилие, прикладываемое к заготовкам, приводит к осадке, то есть изменению длины заготовок тем большей, чем больше время действия усилия. Величина осадки является одним из наиболее значимых параметров процесса, так как обеспечивает чистоту соединяемых поверхностей и сближение их на расстояния, необходимые для схватывания. По имеющимся литературным данным, существует критическое значение величины осадки, ниже которого невозможно получение бездефектного соединения [3,4].

Деформация происходит в очень узкой приконтактной зоне, в которой в результате трения деталей друг о друга произошел значительный разогрев металла. Разогрев торцов свариваемых деталей может привести к изменению микроструктуры и, как следствию - к катастрофической деградации механических свойств материалов в зоне сварки.

Поэтому одной из наиболее важных задач, решаемой при ЛСТ, является оптимизация технологических параметров с целью получения в зоне сварки микроструктуры, которая обеспечит сохранение необходимых эксплуатационных свойств соединяемых материалов.

В данной работе исследовано влияние величины осадки при ЛСТ на микроструктуру в зоне сварного соединения двухфазных титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1, которые в настоящее время рассматриваются как актуальные сплавы для получения твердофазного соединения в авиадвигателестроении.

2. Методики исследования

Содержание основных легирующих элементов исследованных сплавов приведено в таблице 1.

Таблица 1

Содержание основных легирующих элементов исследуемых сплавов

Сплав	Al	V	Zr	Mo	Sn
ВТ6	6,1	5,2	-	-	-
ВТ8М-1	5,0	-	1,5	4,3	1,3

Температура полного полиморфного превращения определена методом пробных закалок и составила для сплава ВТ6 975°С, для сплава ВТ8-1М – 1020°С.

Для сварки образцов была использована установка, обеспечивающая сварку параллелепипедов с поперечным сечением 13×26 мм. Система управления гидродвидами установки обеспечивает поддержание колебательных движений с заданной частотой и амплитудой, и возможность проковки. Длительность процесса устанавливалась косвенно, то есть взаимное движение деталей прекращалось по достижении заданной величины осадки – «осадки нагрева». Таким образом, основными задаваемыми параметрами, определяющими протекание процесса сварки, являются частота f и амплитуда колебаний a , усилие осадки PCB и проковки RPP , время сварки $tЦ$ или величина осадки h .

Для изучения влияния на качество сварного соединения величины осадки были заданы следующие неизменяемые параметры: $a = 2$ мм, $f = 50$ Гц, $PCB = RPP = 100$ МПа. Величину осадки изменяли в интервале от 0,4 до 1,9 мм.

Микрошлифы для микроструктурных исследований готовили в центральной зоне сварного образца. Для выявления структуры подготовленные шлифы травили раствором азотной и плавиковой кислоты в воде. Микроструктурные исследования проводили на оптическом микроскопе «OLYMPUS GX-51» и растровом электронном микроскопе «Jeol JSM-6490LV». Поэлементный анализ проводили с помощью ЭДС анализатора «Oxford Instruments INCA».

Измерение микротвердости проводили на твердомере «MICROMET 5101» при приложении нагрузки 1 Н в течение 10 сек по линии, перпендикулярной линии сварного соединения с шагом 0,5 мм.

Испытания на растяжение проводили на плоских образцах толщиной 2 мм по ГОСТ 6996 с помощью универсальной машины «Instron 5982» при скорости перемещения траверсы 1 мм/мин.

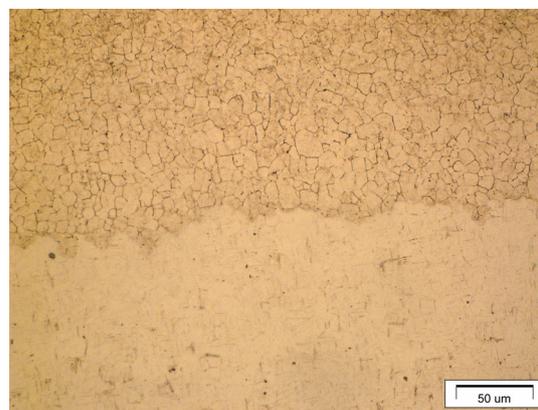
3. Результаты исследования и обсуждение

Микроструктура сплавов в зоне соединения

Анализ микроструктуры показал, что при малой величине осевой деформации – 0,4 мм, - в зоне стыка заготовок наблюдаются протяженные дефектные зоны - поры. На рис. 1а представлен участок стыка с такой дефектной



а)



б)

Рис. 1. Микроструктура зоны сварного шва при величине осевой осадки: а) – 0,4 мм; б) - 1,9 мм

микроструктурой. При увеличении величины осадки дефектные участки шва не наблюдаются, как показано на рис. 16 на примере сварки с осадкой нагрева 1,9 мм.

Проведение локального химического анализа материалов в зоне стыка показало отсутствие перемешивания при любой величине осадки: химический состав с разных сторон стыка соответствует марочному составу сплавов ВТ8М-1 и ВТ6.

Микроструктура образцов после сварки в области контакта двух материалов может быть разделена на 4 зоны: 1 – рекристаллизованная зона; 2 – зона большой пластической деформации; 3 – переходная зона; 4 – зона основного металла. Эти зоны хорошо видны при панорамной съемке сварного соединения и прилегающей к нему зоны (рис. 2). Они различаются по травимости, размерам и форме зерен.

Зона 1 отличается от остальных зон худшей травимостью, в ней наблюдаются крупные практически равноосные зерна β -превращенного зерна. Более подробно структуру этой зоны можно рассмотреть при увеличении растрового электронного микроскопа (рис.3, а). Равноосная форма β -зерен говорит о том, что они образованы после окончания пластической деформации. Средний размер зерен составляет около 15 мкм в сплаве ВТ6 и около 10 мкм в сплаве ВТ8М-1. В пределах β -зерен наблюдается высокодисперсная мартенситная структура, образовавшаяся при быстром охлаждении (рис. 3а).

Зона 2 характеризуется металлографической текстурой: зерна металла вытянуты в направлении, перпендикулярном оси приложения нагрузки, то есть вдоль направления деформации (рис. 3б). Такая структура является следствием значительной пластической деформации в двухфазной ($\alpha+\beta$)-области.

Зона 3 представляет собой переход от объема основного металла, не испытывающего деформации, к зоне большой пластической деформации. Здесь отмечается поворот волокон металла в сторону деформации.

Зона 4 – основной металл, который не испытывает значительного термического и механического влияния. В этой зоне структура не претерпевает заметных изменений и соответствует исходному состоянию.

Все эти зоны наблюдаются со стороны обеих свариваемых деталей. Однако ширина зон для сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 различается, как это видно на рис. 2.

Ширина рекристаллизованной зоны 1 больше со стороны сплава ВТ6, зона больших пластических деформаций 2 наоборот, больше у сплава ВТ8М-1. Это объясняется тем, что термическому воздействию при сварке трением подвергается узкая область, прилегающая к стыку свариваемых металлов. При удалении от стыка температура быстро падает [1,2]. Наблюдаемые структурные изменения свидетельствуют о том, что непосредственно в зоне контакта температура была выше температуры полиморфного превращения обоих сплавов. Однако температура полиморфного превращения сплава ВТ6 ниже, чем у сплава ВТ8М-1. Поэтому область нагрева в однофазной β -области шире у сплава ВТ6. В деформированной β -области после снятия нагрузки очень быстро произошла рекристаллизация с образованием равноосных зерен - зоны 1. Таким образом, зона 1

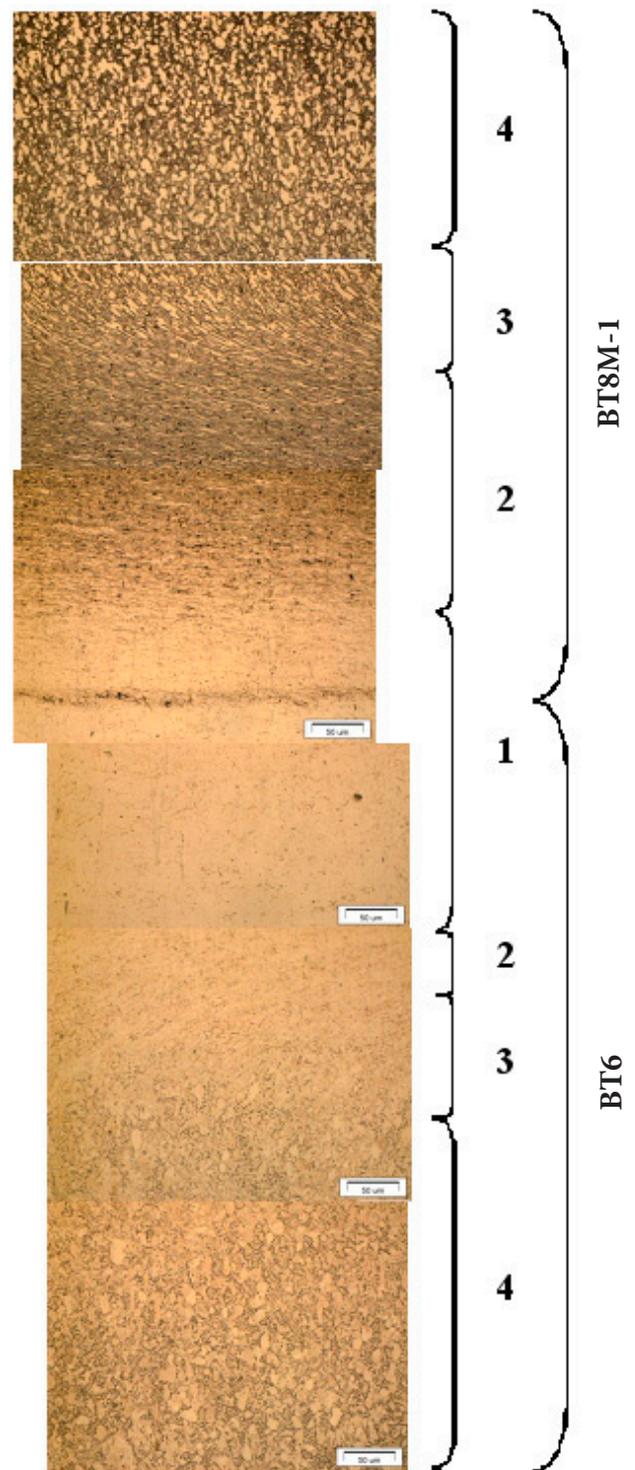


Рис. 2. Панорама зоны шва, полученного при осадке 0,4 мм: выше шва – ВТ8М-1; ниже – ВТ6

является областью большой пластической деформации, только в этой зоне деформация происходила в однофазной области.

Суммарная ширина зон 1 и 2, подвергшихся значительной деформации под влиянием осевой нагрузки, для сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 приблизительно одинакова. Измерения общего изменения размеров образцов после сварки показывает, что около 60 % укорочения приходится на заготовку сплава ВТ6 ввиду того, что прочностные характеристики этого сплава ниже. Тем не менее на ширине зон, подвергшихся термомеханическому воздей-

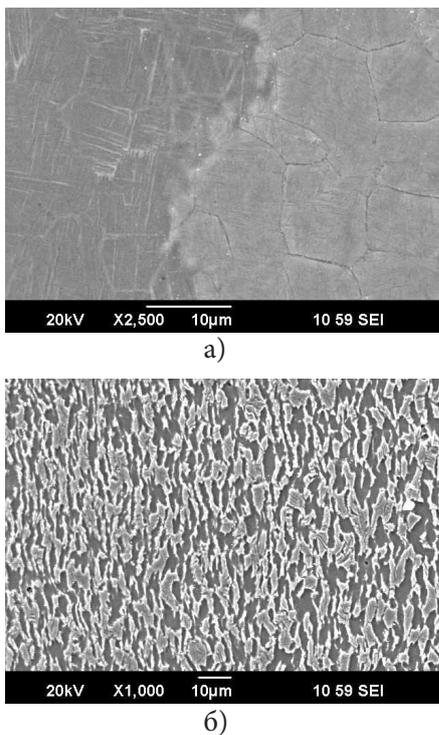


Рис. 3. Микроструктура зоны сварного шва: а – зона 1; б – зона 2..

ствию это не сказывается, так как со стороны сплава ВТ6 больше объем металла, выдавленного в грат.

Переходные зоны 3 разных сплавов также сопоставимы по ширине. Они являются результатом большого градиента температур при удалении от линии сварного шва, и резким снижением в этой связи деформационной способности сплавов.

Размеры зон остаются практически неизменными при увеличении величины осевой осадки.

Микротвердость в зоне сварного соединения

Микроструктурные изменения в зоне сварного соединения оказывают значительное влияние на значение микротвердости, как показано на рис. 4. В зоне сварного шва значения микротвердости в среднем на 100 НВ выше, чем в зоне основного металла. При этом значения микротвердости практически не зависят от величины осевой осадки.

Результаты испытаний на растяжение

Образцы после сварки с величиной осадки 0,4 мм разрушаются по месту стыка двух материалов. Это согласует-

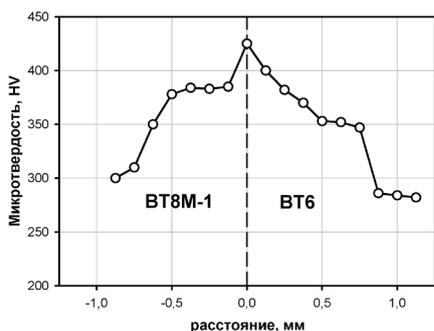


Рис. 4. Распределение микротвердости в образце с величиной осевой осадки 1,4 мм. Штрихпунктирной линией показана линия стыка

ся с результатами металлографического исследования и говорит о том, что формирования сплошного неразъемного соединения не произошло. При нагружении в ходе испытаний на растяжение произошло расслоение соединения по стыку, которое началось из пор и несплошностей сварного соединения. Тем не менее, величина предела прочности оказалась достаточно высокой, как показано в таблице 2.

Разрушение образцов после сварки с величиной осадки 1,4 мм и 1,9 мм произошло по основному материалу. Значение предела прочности несколько возрастает по мере увеличения величины осадки. Средние значения предела прочности для образцов, сваренных при разных значениях осадки, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения предела прочности сварных образцов, полученных при разных значениях осевой осадки

Осевая осадка, мм	σ_B , МПа
0,4	1089
1,4	1124
1,9	1201

На всех образцах после сварки с величиной осадки 1,4 мм и 1,9 мм место разрушения находилось за пределами области термического и механического воздействия, которая характеризуется структурными изменениями, показанными на рис. 2.

Фрактографический анализ изломов

Анализ изломов образцов после механических испытаний подтвердил вывод о получении некачественного соединения при малой величине осевой деформации 0,4 мм. Изломы образцов с такой величиной осадки демонстрируют две зоны, как показано на рис. 5а.

Обширная зона в центральной области излома характеризуется практически зеренной структурой металла (рис. 5г), не характерной для изломов образцов – это области, в которых не образовалось прочного сварного соединения. В отдельных областях наблюдается типичный ямочный излом (рис. 6ж), характерный для разрушения вязкого материала – это зона схватывания, в которой соединение успело сформироваться.

При большей величине осадки наблюдается типичный для плоских пластичных образцов излом, состоящий из двух зон: средняя зона перпендикулярна приложенному усилию, периферийная зона располагается под углом, близким к 45°, она формируется при доломе, в результате изменения напряженного состояния образца (рис. 5д,е). Микростроение изломов этих образцов также ямочное с выраженным рельефом (рис. 5з,и). В периферийных зонах рельеф более сглажен, как видно из рис. 5, и. В центральной зоне некоторых образцов наблюдаются вторичные трещины, направленные вглубь тела образца (рис. 5з).

Таким образом, результаты механических испытаний и фрактографического анализа показывают, что при линейной сварке трением с величиной осадки 1,4 мм и более формируется бездефектное сварное соединение, прочность которого выше, чем прочность основного металла: наблюдается вязкое разрушение по основному ме-

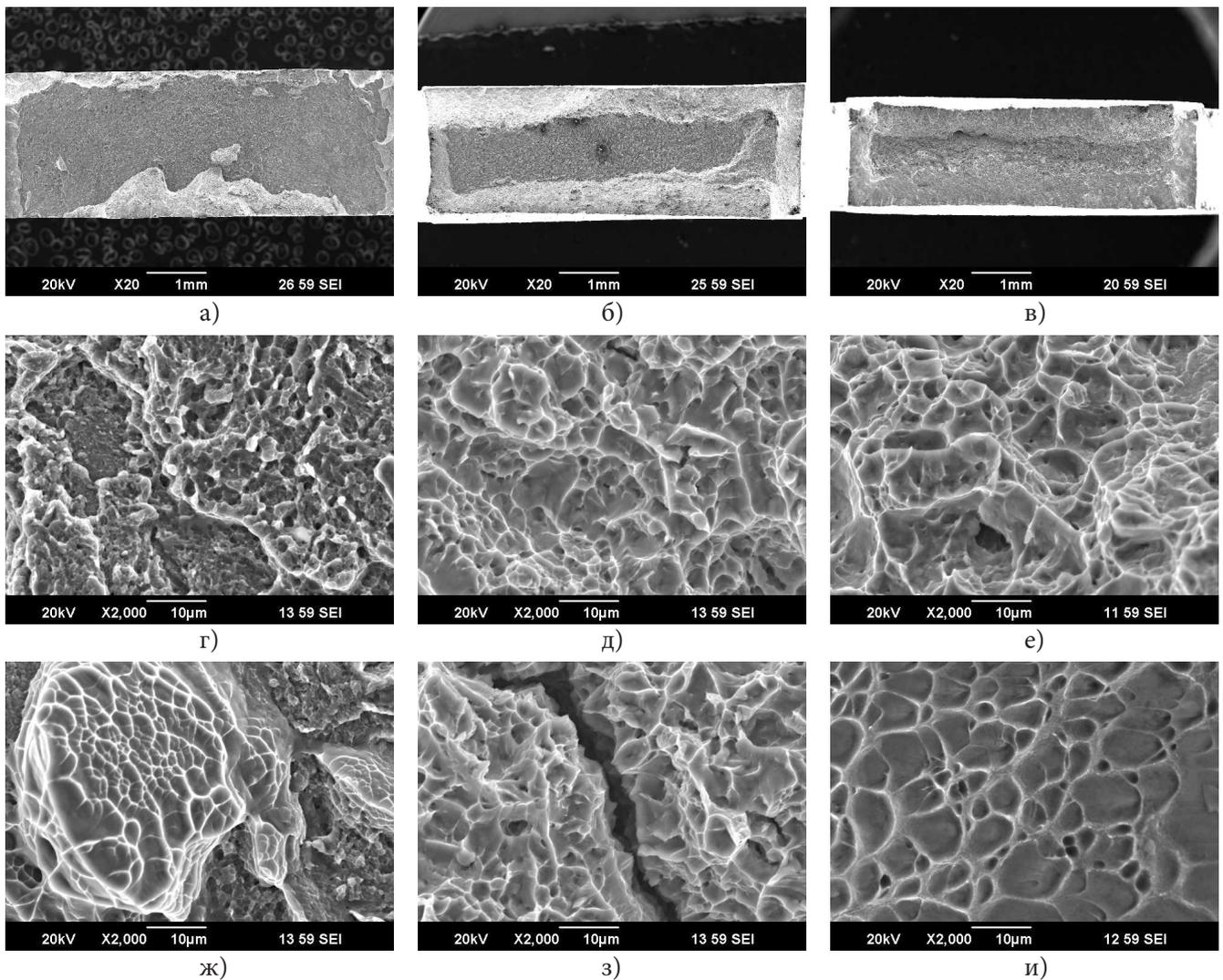


Рис. 5. Фотографии изломов образцов после растяжения: а, ж – осадка 0,4 мм; б, д, з – осадка 1,4 мм; в, е, и – осадка 1,9 мм.

таллу. В результате термического и механического воздействия на металл в процессе линейной сварки трением происходят изменения микроструктуры, характерные для деформации. В зоне, непосредственно прилегающей к линии сварного шва, температура нагрева соответствовала однофазной β -области: наблюдается образование тонкоигольчатой мартенситной структуры в пределах рекристаллизованного мелкого β -зерна, что приводит к упрочнению сплавов. В следующей зоне деформация проходила при более низкой температуре двухфазной области, что привело к увеличению плотности дефектов и, соответственно, также к упрочнению. Поэтому при данном методе сварки линия сварного шва и прилегающая к ней область не являются критическими для разрушения (при условии отсутствия дефектов).

4. Заключение

Величина осадки образцов при линейной сварке трением является одним из основных параметров, определяющих качество сварного соединения. В зоне сварного соединения под влиянием термомеханического воздействия происходят значительные структурные изменения. По особенностям структурных изменений можно выделить следующие зоны в околошовной области: ре-

кристаллизованная зона, зона большой пластической деформации, переходная зона и зона основного металла. Несмотря на различие в механических свойствах и температуре полиморфного превращения протяженность перечисленных зон по обе стороны от стыка мало различается.

ЛСТ с величиной осевой осадки 0,4 мм не обеспечивает получения качественного сварного соединения, в результате чего при испытании на растяжении происходит разрушение по месту стыка. При осевой осадке 1,4 мм и более разрушение происходит по основному металлу.

Работы выполнялись в рамках субсидирования по Постановлению Правительства РФ №218 (Предприятие - инициатор - ОАО УМПО)

Литература

1. A. Varis, M. Frost. *Mat. Sci. Eng.* **A271**, 477 (1999).
2. W.-Y. Li, T.J. Ma, S.Q. Yang. *Mat.letters* **62**, 293 (2008).
3. Wen-Ya Li., T. Ma, J. Li. *Mater. Design.* **31**, 1497 (2010).
4. T. Mohandas, D. Banerjee, V.V. Kutumba Rao. *Mater. Sci. Eng.* **A289**, 70 (2000).