

УДК 539.25:621.791.14

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМГ5 В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИИ, ПОЛУЧЕННОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

¹Елисеев А.А., ¹Калашникова Т.А., ^{1,2}Филиппов А.В., ³Калашников К.Н.,
^{1,2}Белобородов В.А., ¹Чумаевский А.В.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, e-mail: alan@ispms.tsc.ru;*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск;*

³*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

В работе исследованы механические свойства образцов алюминиевого сплава, полученных перемешивающей обработкой трением листового проката различной толщины. Выявлено, что при изготовлении образцов по режимам, представленным в работе, прочностные свойства образцов находятся на уровне прочности исходного материала. Структура сплавов, обработанных трением с перемешиванием, отличается незначительно и средний размер зерна в зоне перемешивания находится на уровне 5–10 мкм. При этом, несмотря на практически одинаковые значения предела прочности для образцов, полученных из листов различной толщины, закономерности протекания процесса деформации данных образцов демонстрируют существенные отличия. Такое положение обусловлено условиями охлаждения материалов различной толщины, различными степенями рекристаллизации материала в зоне перемешивания и, как следствие, существенно отличающимися параметрами стадий деформационного упрочнения и картины изломов.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, перемешивающая фрикционная обработка, микроструктура, предел прочности

MECHANICAL PROPERTIES OF FINE-GRAIN AL-MG ALLOY MADE BY FRICTION STIR PROCESSING ON HOT-ROLLED SHEETS OF DIFFERENT THICKNESS

¹Eliseev A.A., ¹Kalashnikova T.A., ^{1,2}Filippov A.V., ³Kalashnikov K.N.,
^{1,2}Beloborodov V.A., ¹Chumaevskiy A.V.

¹*Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, e-mail: alan@ispms.tsc.ru;*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk;*

³*National Research Tomsk State University, Tomsk*

Friction stir welded butt joints obtained on Al-Mg alloy hot-rolled sheets were characterized for mechanical strength and microstructure. It was revealed that mechanical strength of the weld seam metal is at the level of those of the base metal when welded using the process parameters as found in this work. The microstructures of weld seams obtained on 5 and 10 mm thickness sheets demonstrated only negligible differences so that the mean grain size in both cases was about 5–10 mm. Despite almost equal mechanical tensile strength levels, the structural evolution shows some differences with respect to different sheet thickness. These differences are determined by different heat removal conditions and therefore different degree of recrystallization in a stir zone of the FSP seam. In its turn, this has effect on strain hardening and fracture surface morphology.

Keywords: friction stir welding, friction stir processing, microstructure, tensile strength

Современные технологии создания материалов специального назначения демонстрируют всё более растущий спрос на материалы с нано-, субмикро- и ультрамелкозернистой структурой. Такие материалы обладают повышенными механическими свойствами, коррозионной стойкостью и другими факторами, благоприятно сказывающимися на эксплуатационных характеристиках готового изделия. Основными способами получения объемных материалов с ультрамелкозернистой структурой, состоящей из равноосных зе-

рен размером в доли микрометра и менее, являются методы, основанные на интенсивной пластической деформации. Одним из наиболее часто используемых в настоящее время методов такого типа является равноканальное угловое прессование. Но данный метод, несмотря на свое частое применение, обладает рядом недостатков в получении однородной ультрамелкозернистой структуры, что препятствует его широкому промышленному внедрению. Другие методы, основанные на всесторонней изотермической ковке, позволяют

обойти проблемы, связанные с получением однородной ультрамелкозернистой структуры. Однако они являются чрезвычайно трудоемкими и дорогостоящими, поскольку возникает необходимость использования жаропрочного деформирующего инструмента и специального нагревательного устройства.

Одним из существенных недостатков применяемых в настоящее время методов интенсивной пластической деформации является необходимость использования нескольких проходов для получения минимально возможного размера зерна и достижения максимально возможной степени деформации. При этом во многих случаях, для того чтобы избежать растрескивания, требуется проводить промежуточные отжиги для снятия наклепа материала.

Таким образом, задача разработки научных основ новых методов деформационной обработки материалов в неизотермических условиях, лишенных указанных недостатков, для получения объемных материалов с однородной ультрамелкозернистой структурой и улучшенными механическими свойствами является актуальной.

Известно, что при использовании всех методов интенсивной пластической деформации, используемых для получения объемных мелкозернистых материалов, значительную роль играет трение между поверхностями деформируемого образца и поверхностями инструмента (фильтры, валика и т.п.). Трение на границе материал – инструмент существенно изменяет напряженно-деформированное состояние вблизи поверхности образца, что приводит к повышению степени деформации в данной области и образованию сильнодеформированного слоя. При этом могут активизироваться дополнительные механизмы деформации, такие как складкообразование.

Описанное поведение материала является подтверждением того факта, что пластическая деформация наиболее интенсивно развивается и достигает максимальных степеней в условиях стесненного сдвигового нагружения. Условия интенсивного сдвига в стесненных условиях наиболее полностью реализуются при трении скольжения в поверхностных слоях контактирующих тел.

Результаты исследований поверхностных слоев, образовавшихся при трении, показывают, что в результате фрикционного нагрева и интенсивной пластической деформации материал в них сильно фрагментируется и может переходить в нанокристаллическое состояние. Это приводит к изменению механизмов деформирования и влияет на дальнейшее поведение системы

трения в целом. Одним из механизмов образования нанокристаллического слоя является развитие сдвиговой неустойчивости в условиях адгезионного контакта.

В связи с вышесказанным перспективным направлением представляется разработка и применение новых подходов, основанных на технологии фрикционного воздействия, которые обеспечили бы получение объемных наноструктурных материалов.

Среди методов, позволяющих изготавливать детали с ультрамелкодисперсной структурой с наибольшей производительностью, а также формировать сварные соединения с прочностью шва выше прочности основного материала, выделяется сварка трением с перемешиванием и перемешивающая фрикционная обработка [1–9]. При этом на настоящее время для деталей, получаемых с помощью данной технологии, небольшое количество информации имеется как с точки зрения структуры в области перемешивания [8] и износа инструмента в процессе сварки [6], так и методов контроля качества получаемых образцов [5, 7]. Одним из необходимых к изучению на настоящее время свойств материалов, полученных перемешивающей обработкой трением, является зависимость механических свойств, особенностей деформации и разрушения под действием приложенной нагрузки от толщины исходного листового материала, из которого изготавливаются образцы, изучению чего посвящена настоящая работа.

Материалы и методы исследования

В работе проводилось исследование образцов сплава АМг5 толщиной 5 и 10 мм, подвергнутых перемешивающей фрикционной обработке. Обработка образцов толщиной 10 мм проводилась при нормальном давлении 30 кН, скорости вращения инструмента 475 об/мин и подаче 115 мм/мин. Образцы толщиной 5 мм изготавливали при давлении 25 кН, скорости вращения инструмента 550 об/мин и подаче 450 мм/мин. Проход проводили по листу алюминия проката с образованием в материале нескольких характерных зон (рис. 1). Основная интересующая в настоящей работе зона в образце – зона перемешивания, представленная сплавом АМг5 в практически полностью рекристаллизованном ультрамелкодисперсном состоянии, о чем свидетельствует ровная округлая форма зерен в данной области (ЗП на рис. 1).

Вторичные зоны – зона термомеханического влияния (ЗТМВ на рис. 1) характеризуется наличием сильно деформированных зерен листового проката и следов частичной рекристаллизации. Зона термического влияния (ЗТВ на рис. 1) представлена зернами базового металла (БМ на рис. 1) со следами термического воздействия. Для изучения свойств материала в ультрамелкозернистом состоянии вырезались образцы для механических испытаний в виде лопаток таким образом, чтобы рабочая зона образцов обеих исходных толщин имела размеры 3*4*10 мм и совпа-

дала с областью зоны перемешивания (ОМ на рис. 1). Испытания проводили на разрывной машине УТС 110М-100 1-У на растяжение при скорости испытания 1 мм/мин и скорости записи диаграммы 10 мс. Структурные исследования проводили на оптическом микроскопе Altami MET1-C и растровом электронном микроскопе SEMTRAC mini SM3000. Для испытаний изготавливали не менее 10 образцов каждого типа.

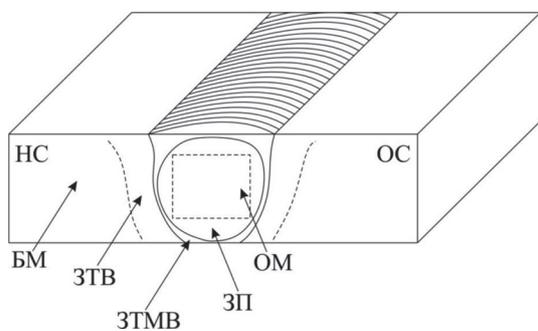


Рис. 1. Схема вырезки образцов для механических испытаний

Результаты исследования и их обсуждение

В результате фрикционной перемешивающей обработки в зоне перемешивания происходит разрушение исходной структуры сплава (рис. 2, а) с образованием ультрамелкозернистой зеренной структуры (рис. 2, б). При этом независимо от толщины исходных листов размер зерна в зоне перемешивания находится на уровне 5–10 мкм.

Пластическая деформация образцов, полученных из листового материала одной толщины (5 мм), характеризуется диаграммами испытания с практически идентичными стадиями пластической деформации (см. рис. 3) и пределами прочности в среднем на уровне 300 МПа (в представленных диа-

граммах 301,4 МПа и 298,0 МПа). По сравнению с исходным материалом в состоянии поставки прочность образцов в ультрамелкозернистом состоянии выше на 10%.

При деформации образцов, полученных из листового проката толщиной 10 мм, предел прочности также находится на уровне 300 МПа (на представленном графике 297,3 МПа), но параметры стадий деформационного упрочнения существенно отличны (отличный коэффициент деформационного упрочнения и параболичность на третьей стадии) в данном случае существенно отличны и разрушение, в отличие от одномоментного разрушения с предшествующей стадией с практически постоянным значением нагружающего усилия, характерного для образцов первого типа, происходит с предшествующим ступенчатым снижением нагрузки, обусловленным поэтапным формированием излома в центральной части образца.

Деформация образцов толщиной 5 мм по достижении третьей (параболической) стадии деформационного упрочнения происходит с наличием ярко выраженных колебаний в изменении нагружающего усилия, что связано с реализацией в данном материале эффекта Портвена-Ле-Шателье, обусловленного поэтапным образованием и преодолением барьеров скоплениями дислокаций.

Большинство металлов и сплавов подвержены влиянию эффекта прерывистой текучести в основном при низких температурах (например, жидкого гелия) и при высоких температурах (до 0,7 от температуры плавления) [6]. При этом для ряда материалов температурные зависимости протекания процесса деформации являются ярко выраженными при низких температурах и практически отсутствует эффект прерывистой текучести при комнатной температуре.

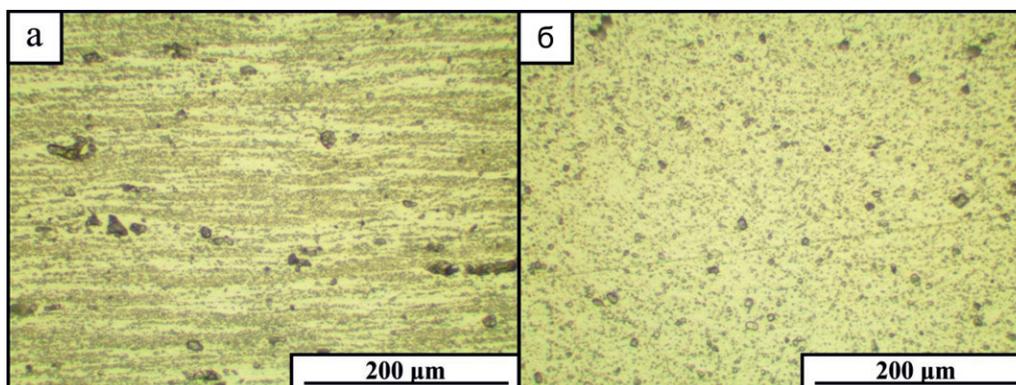


Рис. 2. Структура исходного материала (а) и зоны перемешивания (б)

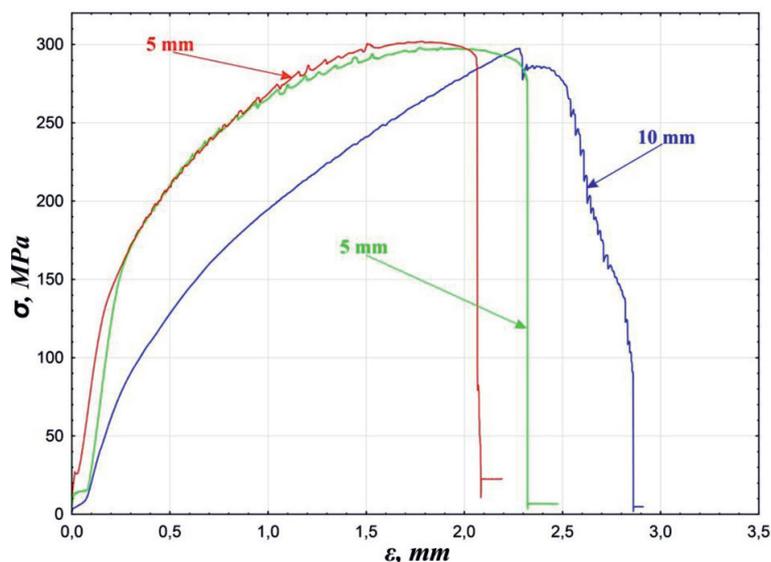


Рис. 3. Диаграммы испытания образцов

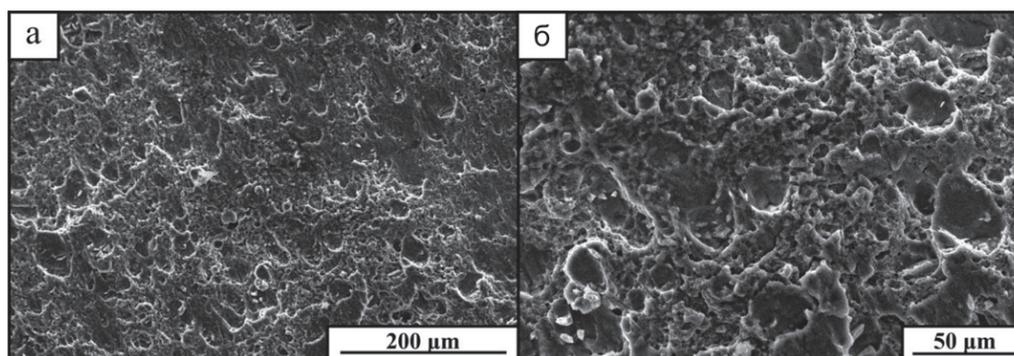


Рис. 4. Строение излома образца, полученного из листа сплава АМг5 толщиной 5 мм

Сплав АМг5 является сплавом, подверженным влиянию эффекта Портьена – Ле-Шателье в исходном крупнозернистом состоянии при деформации в условиях комнатной температуры, что подтверждается данными работ. Но форма пиков в данном случае имеет другой вид и свидетельствует о существенных изменениях в условиях пластического течения материала образцов с уменьшением размера зерна. Также, для образцов толщиной 10 мм, эффект прерывистой текучести является слабо выраженным в процессе деформации, хотя предел прочности образцов находится на том же уровне, что и образцов сплава АМг5 толщиной 5 мм.

Величина скачков (пиков) нагрузки для образцов сплава АМг5 толщиной 5 мм на диаграмме (рис. 3) увеличивается с ростом

напряжения и достигает максимума перед переходом к четвертой стадии деформации с практически постоянным значением нагружающего усилия. Четвертая стадия характеризуется также слабо выраженными колебаниями нагрузки и практически полным отсутствием скачкообразного изменения нагружающего усилия.

Такие отличия в стадийности пластической деформации обуславливают различный характер строения изломов образцов первого и второго типа (рис. 4, 5). Для образцов, полученных перемешивающей обработкой трением из листов толщиной 5 мм, характерно достаточно ровное строение излома на макроуровне с наличием выраженной «шейки» в месте разрушения. Излом в основном представлен ямочный, с наличием элементов типа квазисколов (рис. 4).

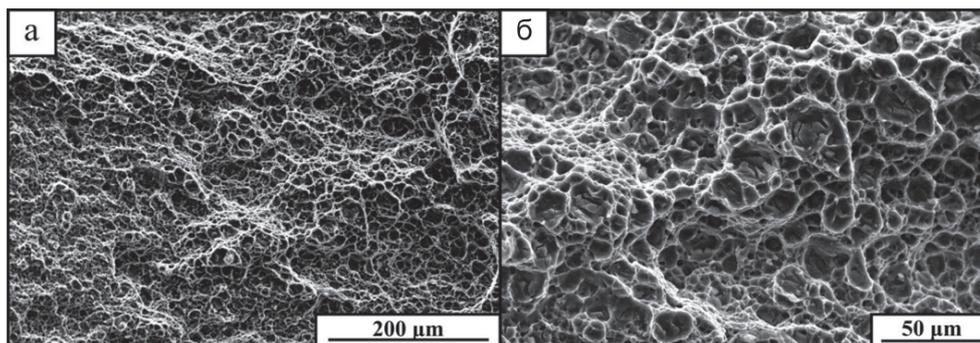


Рис. 5. Структура излома образца, полученного из листа сплава АМg5 толщиной 10 мм

Разрушение образцов, полученных из листового проката толщиной 10 мм, напротив, происходит без образования ярко выраженной шейки с более сложным строением излома несмотря на то, что в данном случае практически не выделяется элементов типа квазисколов (рис. 5). Поверхность излома в данном случае имеет волнообразный характер, что обуславливает поэтапное развитие трещины и разрушение образца в соответствии с диаграммой разрушения (рис. 3), хотя излом по большей части является чисто ямочным.

Заключение

Таким образом, в ходе механических испытаний образцов, полученных перемешивающей фрикционной обработкой выявлены особенности протекания процесса пластической деформации в зависимости от толщины исходного материала и режима обработки. Проведенные исследования показывают, что изготовление образцов алюминиевых сплавов с ультрамелкозернистой структурой методом перемешивающей фрикционной обработки по прочностным характеристикам превосходят образцы исходного материала на величину до 10%. Существенное значение изменение толщины исходного листа влияет на реализацию при деформации прерывистой текучести, обусловленной эффектом Портвена – Лешателье и характерной для сплава в исходном состоянии, но по-разному выраженной в образцах с ультрамелкодисперсным строением, полученных по различным режимам и из листового проката различной толщины. Изменение режимов, характерных для изготовления образцов из листов проката различной толщины, ввиду различного инструмента и условий обработки, отличия в условиях отвода тепла от области перемешивания и др. приводят к тому, что, несмотря на практически одинаковый размер зер-

на, условия испытания и размер образцов, пластическая деформация и разрушение проходят по различным механизмам, что свидетельствует об отличиях в структурно-фазовом состоянии образцов, что должно учитываться при изготовлении деталей из ультрамелкозернистых материалов данным методом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 16-48-700652 p_a.

Список литературы

1. Бакшаев В.А. Сварка трением с перемешиванием в производстве крупногабаритных изделий из алюминиевых сплавов. / В.А. Бакшаев, П.А. Васильев // Цветные металлы. – 2014. – № 1. – С. 75–79.
2. Диденко Д.А., Пустовалов В.В., Вершинина В.В. Об особенностях пластической деформации монокристаллов алюминия в интервале температур 1,3–4,2 К // ФММ. – 1967. – Т. 23. – Вып. 2. – С. 328–335.
3. Клявин О.В. Особенности пластической деформации кристаллических тел при гелиевых температурах // Физические процессы пластической деформации при низких температурах. – Киев: Наукова думка, 1974. – С. 5–30.
4. Кришталл М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть I. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести / Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 5. – С. 5–29.
5. Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Тарасов С.Ю. Методика ультразвукового контроля сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, с использованием технологии фазированной антенной решетки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16485>.
6. Тарасов С.Ю., Калашникова Т.А., Калашников К.Н., Рубцов В.Е., Елисеев А.А., Колубаев Е.А. Адгезионно-диффузионное изнашивание стального инструмента при сварке трением алюминиевого сплава АМг5М. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 7. – С. 39–44.
7. Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Рубцов В.Е. Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6–2. – С. 296–300.
8. Фортуна С.В., Рубцов В.Е., Елисеев А.А., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А. Эволюция структурнофазового состояния сплава д16т при интенсивном термомеханическом воздействии в условиях сварки трением с перемешивани-

ем // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. № 6–2. – С. 285–290.

9. Friction stir welding: From basics to applications. Ed. by D. Lohwasser and Zh. Chen Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC. – 2010. – 432 p.

References

1. Bakshaev V.A. Svarka treniem s peremeshivaniem v proizvodstve krupnogabaritnyh izdelij iz aljuminievyh splavov. / V.A. Bakshaev, P.A. Vasilev // Cvetnye metally. 2014. no. 1. pp. 75–79.

2. Didenko D.A., Pustovalov V.V., Vershinina V.V. Ob osobnostjah plasticheskoj deformacii monokristallov aljuminija v intervale temperatur 1,3–4,2 K // FMM. 1967. T. 23. Vyp. 2. pp. 328–335.

3. Kljavin O.V. Osobnosti plasticheskoj deformacii kristallicheskih tel pri gelievych temperaturah // Fizicheskie processy plasticheskoj deformacii pri nizkih temperaturah. Kiev: Naukova dumka, 1974. pp. 5–30.

4. Krishtall M.M. Neustojchivost i mezoskopicheskaja neodnorodnost plasticheskoj deformacii (analiticheskij obzor). Chast I. Fenomenologija zuba tekuchesti i preryvistoj tekuchesti / Fizicheskaja mezomehanika 7 5 (2004). pp. 5–29.

5. Rubcov V.E., Kolubaev E.A., Tarasov S.Ju. Metodika ultrazvukovogo kontrolja svarnyh soedinenij, poluchennyh svarkoj treniem s peremeshivaniem, s ispolzovaniem tehnologii fazirovannoj antennoj reshetki // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 6. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16485>.

6. Tarasov S.Ju., Kalashnikova T.A., Kalashnikov K.N., Rubcov V.E., Eliseev A.A., Kolubaev E.A. Adgezionno-diffuzionnoe iznashivanie stalnogo instrumenta pri svarke treniem aljuminievogo splava AMg5M. // Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah. 2015. no. 7. pp. 39–44.

7. Filippov A.V., Tarasov S.Ju., Kolubaev E.A., Rubcov V.E. Opredelenie defekta v vide zaglazhennogo neprovora posle svarki treniem s peremeshivaniem pri nerazrushajushhem kontrole // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 6–2. pp. 296–300.

8. Fortuna S.V., Rubcov V.E., Eliseev A.A., Tarasov S.Ju., Kolubaev E.A. Jevoljucija strukturnofazovogo sostojanija splava dl6t pri intensivnom termomehanicheskom vozdejstvii v uslovijah svarki treniem s peremeshivaniem // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika. 2015. T. 58. no. 6–2. pp. 285–290.

9. Friction stir welding: From basics to applications. Ed. by D. Lohwasser and Zh. Chen Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC. 2010. 432 p.