

Физические методы диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах
Часть 1. Механические испытания*

В. В. Поляков^{1,2}, Е. А. Колубаев^{2,3}, Д. С. Салита¹, А. А. Дмитриев¹

¹ Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

² Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия)

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск, Россия)

Physics Methods of Welded Joints Diagnostics in Aluminum Alloys. Part 1. Mechanical Tests

V.V. Polyakov^{1,2}, E.A. Kolubaev^{2,3}, D.S. Salita¹, A.A. Dmitriev¹

¹ Altai State University (Barnaul, Russia)

² Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia)

³ National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

Проведено исследование прочностных свойств сварных соединений в алюминий-магниевого сплавах, полученных по технологии сварки трением с перемешиванием. Сварные соединения были изготовлены при различных значениях основных параметров — скорости поступательного движения вращающегося инструмента и усилия прижатия соединяемых элементов друг к другу. Механические испытания проводились по схеме статического растяжения с построением кривой деформационного упрочнения и оценкой прочности при разрыве и предельной деформации. Исследовалась также структура поверхностей разрушения образцов с различными сварными швами в сопоставлении с материалом без сварного соединения.

Выявлены существенные различия в деформационном поведении образцов алюминий-магниевого сплавов, полученных при разных режимах сварки трением с перемешиванием. Эти различия обусловлены формированием в зоне сварного соединения дефектов структуры (пор, микротрещин и т. д.). Появление таких дефектов приводит к смене физических механизмов разрушения и вызывает уменьшение прочностных характеристик.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов диагностики и контроля сварных соединений.

This paper presents an investigation of welded joints strength properties in aluminum-magnesium alloys produced with a friction stir welding technology. Welded joints have been produced under various conditions with specific key parameters for each condition, such as velocity of rotary tool translational motion and clamping force applied to assembled elements. Mechanical tests are performed using a static tension approach, and curves of strain hardening and evaluations of strength under critical strain and fracture conditions are obtained. Additionally, fracture surface structures of samples with various welded joints are analyzed and compared with structures of samples without welded joints.

It is revealed that there are significant differences in deformation behavior of aluminum-magnesium alloys produced under different conditions of a friction stir welding. These differences are caused by structure defects (pores, micro cracks, etc.) at the welding area. The structure defects are responsible for changes in fracture mechanisms and decrease of strength properties.

The obtained results appear to be promising for welded joints diagnostic methods development.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 (договор № 02. G25.31.0063) и в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 288).

Ключевые слова: диагностика материалов, структура, разрушение, механические испытания, алюминиевые сплавы, сварка трением с перемешиванием (friction stir welding).

Key words: testing of materials, structure, fracture, mechanical tests, aluminum alloys, friction stir welding

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.1-07

Введение. Широкое распространение в современной технике получили конструкции, изготавливаемые из сплавов на основе алюминия. Применение этих сплавов в таких отраслях, как авиастроение, автомобилестроение, космическое машиностроение, предъявляет повышенные требования к структуре и механическим свойствам материала. Одним из способов объединения элементов в конструкцию служит сварка, однако для ряда сплавов на основе алюминия обычные виды сварки плавлением не всегда оказываются возможными. Для соединения элементов из таких сплавов приходится использовать специальные способы и технологические приемы, среди которых одним из наиболее эффективных является сварка трением с перемешиванием [1–5]. Изготавливаемые сварные соединения вследствие значительных градиентов температуры и деформации отличаются повышенной неоднородностью и дефектностью структуры. При внешнем механическом воздействии дефекты структуры сварных швов вызывают преждевременное трещинообразование и разрушение. Поскольку получаемые конструкции могут использоваться в экстремальных условиях эксплуатации, указанное обстоятельство требует проведения тщательной диагностики сварных соединений [6–7]. Такая диагностика должна основываться на знании закономерностей формирования структуры сварных соединений и особенностей развития в этих соединениях пластической деформации и разрушения. В настоящей работе проводится исследование поведения при механическом нагружении сварных швов в алюминиевых сплавах, полученных сваркой трением с перемешиванием.

Материалы для испытаний. Исследования проводились на образцах алюминий-магниевого сплава АМг5М в отожженном состоянии. Образцы для испытаний на статическое растяжение изготавливались из плоских листов толщиной 5 мм, центральная (рабочая) часть содержала сварное соединение. Образцы имели стандартную форму для испытаний на растя-

жение, их длина составляла 160 мм, размер рабочей части — 50×15 мм.

Процесс сварки трением с перемешиванием заключается в следующем. Специальный вращающийся инструмент поступательно движется вдоль соединяемых поверхностей свариваемых элементов, за счет трения температура этих поверхностей повышается. Материал вблизи инструмента переходит в пластическое состояние и огибает вращающийся инструмент, перемещаясь из одного элемента в другой и создавая за счет такого перемещения сварное соединение. Основными технологическими параметрами сварки трением с перемешиванием являются скорость вращения инструмента, скорость поступательного движения инструмента и усилие прижатия соединяемых элементов друг к другу. Различные сочетания этих параметров приводят к различиям в структуре сварного соединения, формированию в объеме сварного шва тех или иных дефектов и, как следствие, к существенным изменениям прочности соединения.

Для исследования особенностей процессов пластической деформации и разрушения, обусловленных наличием разных видов дефектов в сварном шве, специально задавались различные технологические режимы сварки. Наряду с использованием режима 1, который обеспечивал наиболее высокие прочностные характеристики, применялись режимы со значительными отклонениями, при которых в сварном соединении возникали значительные дефекты структуры. В настоящей работе были исследованы сварные соединения, возникавшие при повышении скорости поступательного движения инструмента (режим 2) и при уменьшении усилия прижатия соединяемых пластин (режим 3). Скорость вращения инструмента во всех трех использованных режимах не изменялась. Параметры использованных технологических режимов приведены в таблице. Кроме того, для сопоставления наряду с испытанием образцов, содержащих сварное соединение, были проведены измерения

Режимы сварки трением с перемешиванием

Режим сварки	Скорость вращения инструмента, об./мин.	Усилие прижатия свариваемых элементов, кг	Скорость поступательного движения, м/мин.
1	560	2600	500
2	560	2600	700
3	560	2100	500

для сплошных (без сварки) образцов алюминий-магниевых сплавов.

Результаты испытаний. Испытания на статическое растяжение проводились на машине механических испытаний с постоянной скоростью деформации вплоть до разрыва образцов с регистрацией приложенной нагрузки F и абсолютного удлинения ΔL . Типичные кривые нагружения в координатах F - ΔL приведены на рисунках 1–4.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном различии процессов пластической деформации и разрушения для образцов, изготовленных в разных условиях. Эти различия проявляются в изменении вида кривой нагружения и значений основных прочностных характеристик. Наблюдалось уменьшение предела прочности и предельной деформации, оцениваемых по точке обрыва кривой нагружения (соответствовавшей разделению образца на две

части). Предельная нагрузка уменьшалась от значений 32 кН (сплошной материал) до 24 кН для режима 1 и далее — до значений 19 и 17 кН для образцов, полученных при режимах 2 и 3. Предельная абсолютная деформация уменьшалась соответственно от значений 16 мм (сплошной материал) и 13 мм (режим 1) до значений 6,5 и 6 мм (режимы 2 и 3). Вид кривой деформационного упрочнения свидетельствовал, что при оптимальном режиме сварки, как и для сплошного материала, разрушение происходило в один этап. Этому отвечало распространение магистральной трещины, приводящее к разрыву образца. Для образцов, изготовленных с отклонением от оптимального режима, разрушение происходило в несколько этапов. По-видимому, это отражало возникновение и скачки нескольких магистральных трещин, порожденных крупными дефектами в структуре сварного шва [8; 9].

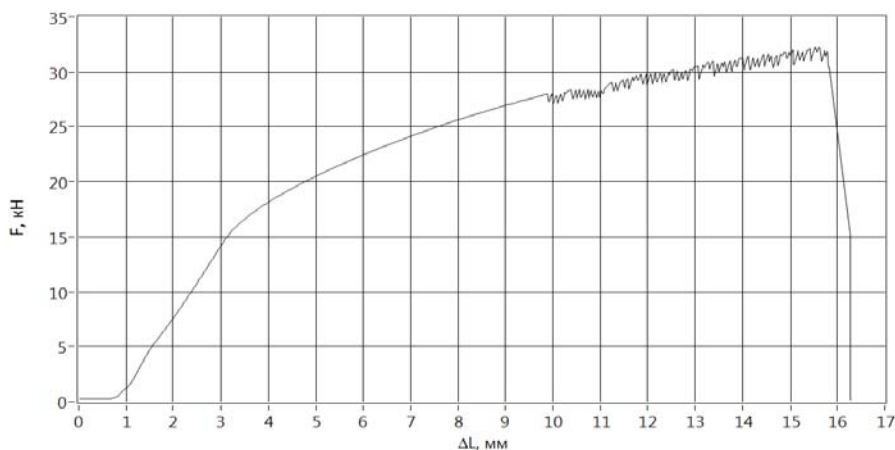


Рис. 1. Кривая деформационного упрочнения алюминий-магниевого сплава без сварного соединения

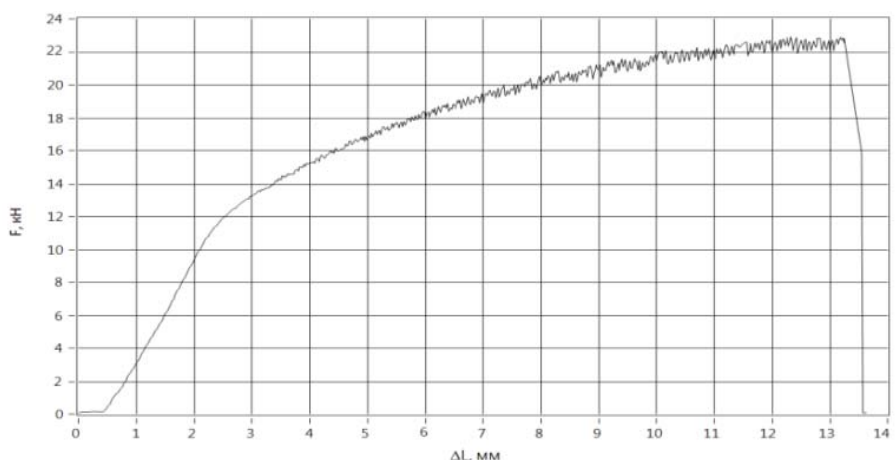


Рис. 2. Кривая деформационного упрочнения алюминий-магниевого сплава со сварным соединением (режим 1)

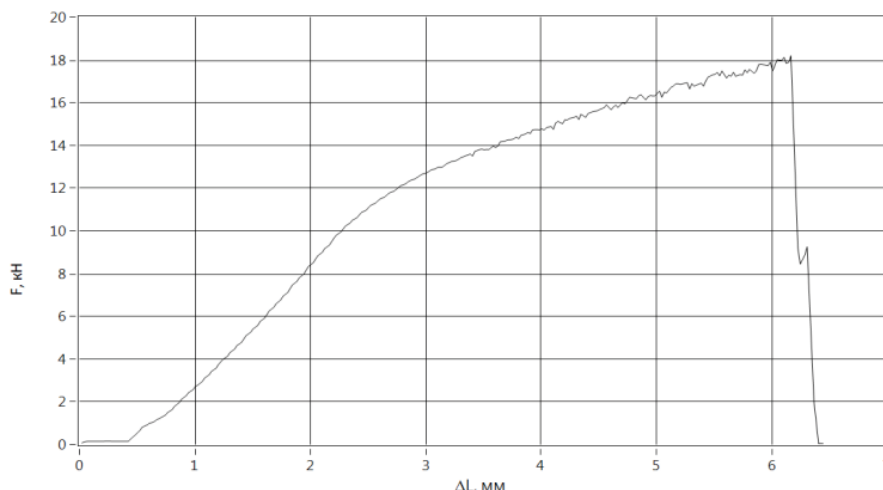


Рис. 3. Кривая деформационного упрочнения алюминий-магниевого сплава со сварным соединением (режим 2)

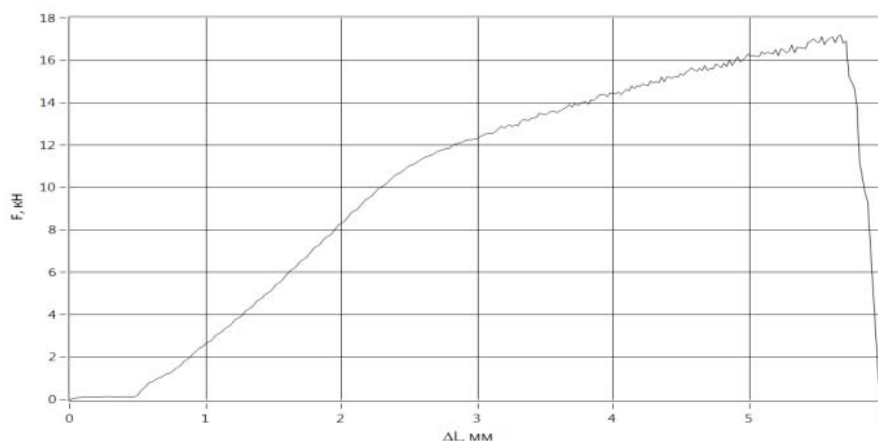


Рис. 4. Кривая деформационного упрочнения алюминий-магниевого сплава со сварным соединением (режим 3)

Существенные различия в процессах образования и развития трещин отчетливо проявлялись в изменениях структуры поверхности разрушения, которые анализировались с помощью оптического микроскопа. Фотографии поверхностей разрушения, соответствовавшие образцам без сварного шва и полученные при различных режимах сварки, приведены на рисунках 5–8.

Как следует из рисунков 5, 6, разрушение образцов без сварного шва и образцов, изготовленных при режиме 1, возникало на границе между швом и исходным материалом, при этом поверхность разрушения развивалась под углом 45° к оси растяжения от внешних областей в объем материала и имела вид скола. Отклонение от оптимального режима 1 приводило к изменению направления развития магистральных трещин. Для образцов, изготовленных

при режимах 2 и 3, разрушение развивалось в плоскости, проходившей непосредственно по центру сварного соединения перпендикулярно к оси деформации. Для режима 2 поверхность разрушения имела вид характерных крупных ямок, подобный же вид с уменьшением размера ямок наблюдался для режима 3. Такой вид поверхности обусловлен образованием в зоне сварного соединения крупных дефектов структуры, прежде всего несплошностей разных видов (пор, микротрещин, включений и т. д.). Отметим, что до нагружения сварные швы образцов, изготовленных при разных режимах, не отличались по внешнему виду.

Заключение. Выявленные различия в деформационном поведении образцов алюминий-магневых сплавов, полученных при разных режимах сварки трением с перемешиванием, обусловлены образова-

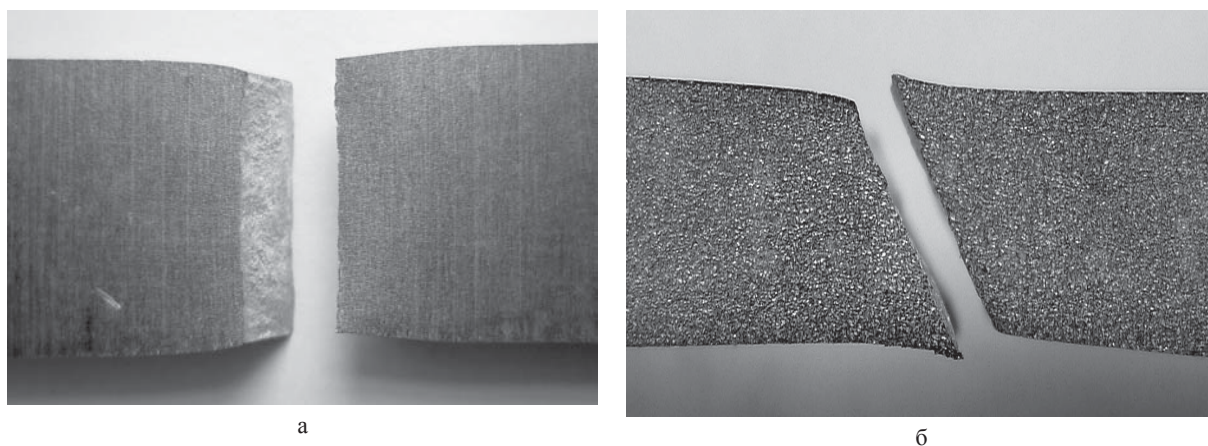


Рис. 5. Разрушенный образец без сварного соединения: а — вид сверху; б — вид сбоку

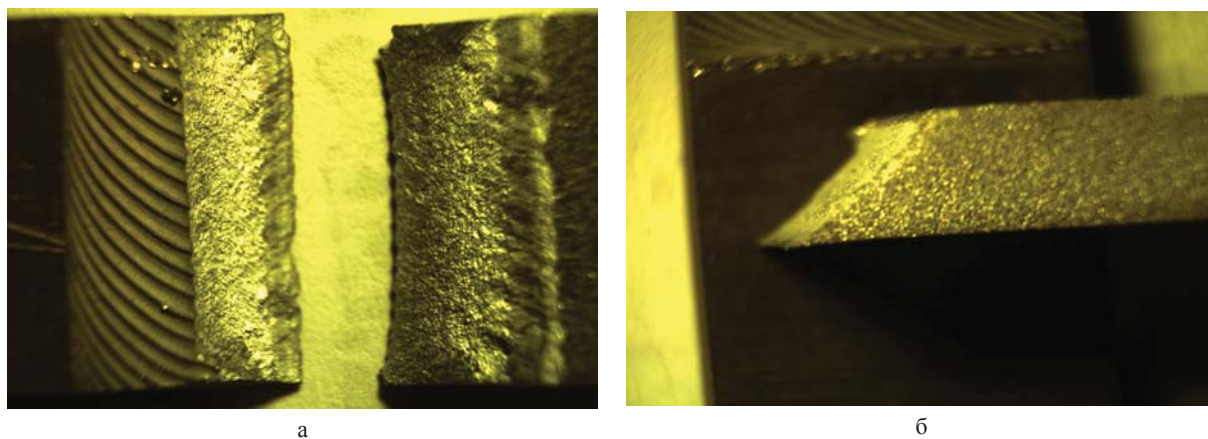


Рис. 6. Разрушенный образец со сварным соединением (режим 1): а — вид сверху; б — вид сбоку

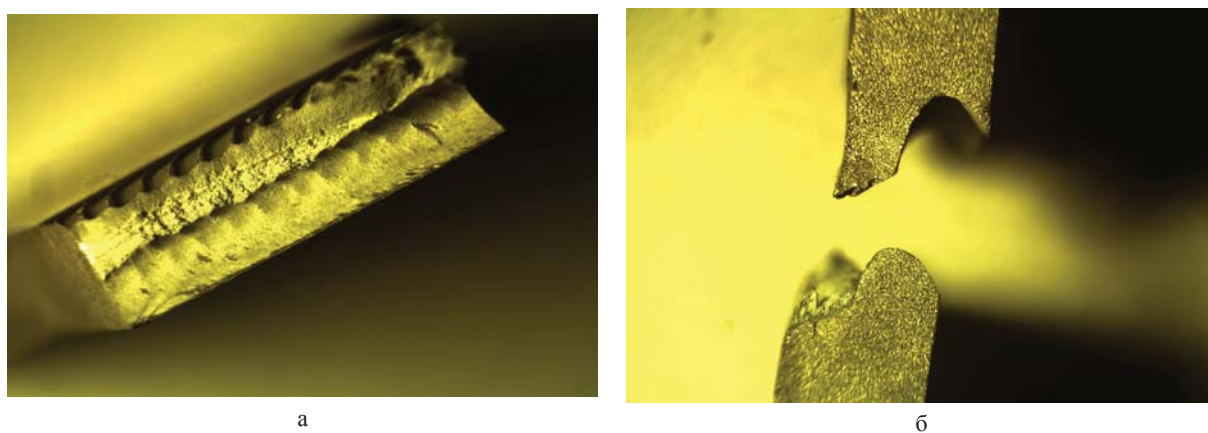


Рис. 7. Разрушенный образец со сварным соединением (режим 2): а — вид сверху; б — вид сбоку

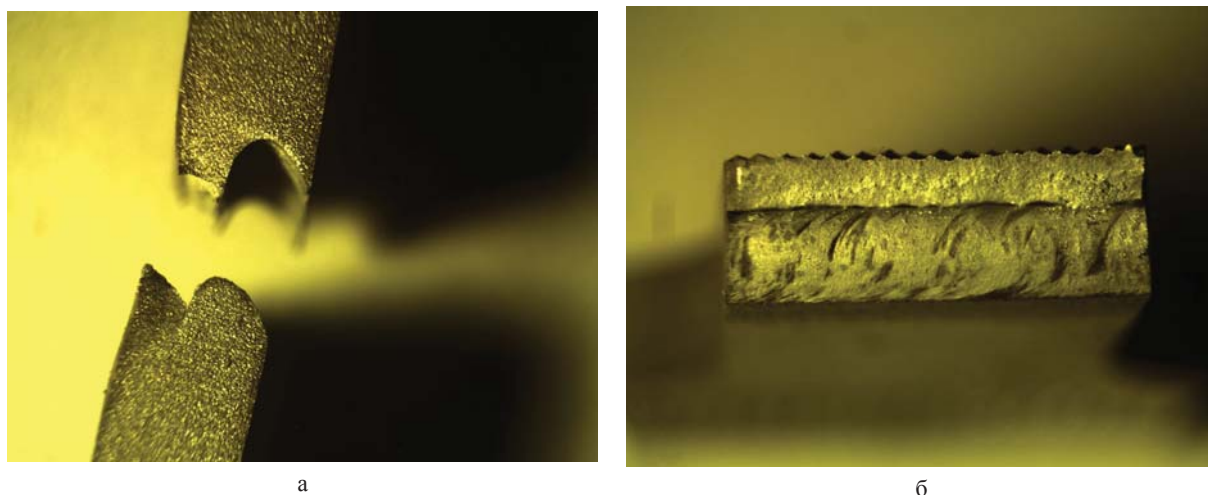


Рис. 8. Разрушенный образец со сварным соединением (режим 3): а — вид сверху; б — вид сбоку

ем в зоне сварного соединения различных дефектов структуры. Эти дефекты выступают в качестве основных концентраторов упругих напряжений в зоне сварного соединения, их формирование вызывает смену физических механизмов пластической деформации

и разрушения и приводит к уменьшению прочностных характеристик. Полученные результаты необходимо учитывать при проведении контроля структуры и механических свойств сварных соединений и разработки новых методов их диагностики.

Библиографический список

1. Карманов В.В., Каменева А.Л., Карманов Вит.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2012. — № 32.
2. Миронов С.Ю. Формирование зеренной структуры при сварке трением с перемешиванием // Физическая мезомеханика. — 2014. — Т. 17, № 1.
3. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Mater. Sci. Eng. R. — 2005. — Vol. 50.
4. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H. Recent Advances in Friction-Stir Welding — Process, Weldment Structure and Properties // Pros. Mater. Sci. — 2008. — Vol. 53.
5. Ищенко А.Я., Подъяельников С.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. — 2007. — № 11.
6. Старцев О.В., Медведев И.М., Поляков В.В., Беляев И.А. Оценка коррозионных поражений алюминиевого сплава методами фрактального анализа и твердости индентации // Коррозия: материалы, защита. — 2014. — № 6.
7. Егоров А.В., Поляков В.В., Пирогов А.А., Колубаев Е.А. Многочастотная вихретоковая дефектоскопия алюминиевых сплавов // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2014. — № 1/2.
8. Поляков В.В., Сыров Г.В., Демьянов Б.Ф. Особенности пластической деформации пористых металлов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1996. — № 3.
9. Панин В.Е., Поляков В.В., Сыров Г.В., Фадеев А.В. Эволюция механизмов пластической деформации в пористых металлах // Известия вузов. Физика. — 1996. — № 1.