

УДК 621.791

Ю.В. Столянков¹, В.И. Лукин¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹**ПАЙКА ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
АМОРФНЫМ ЛЕНТОЧНЫМ ПРИПОЕМ ВПр51**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-3-3

Приводится описание особенностей структуры и свойств аморфного ленточного припоя на основе никеля марки ВПр51, предназначенного для высокотемпературной пайки тонкостенных элементов конструкций из нержавеющей сталей и сплавов на основе никеля. Приводятся требования к его составу, описана процедура определения режимов пайки, предусматривающая выбор температуры и времени выдержки, определены технологические свойства припоя, такие как растекаемость и смачиваемость, оценена его эрозионная активность по отношению к основному материалу. Приведены также данные о прочностных характеристиках паяных соединений, полученных с использованием припоя ВПр51 в виде аморфной ленты.

Ключевые слова: аморфный ленточный припой, тонкостенный элемент конструкции, пайка.

Yu.V. Stolyankov¹, V.I. Lukin¹, A.N. Afanasyev-Hodykin¹**THIN-WALLED STRUCTURAL COMPONENT SOLDERING
BY AMORPHOUS TAPE SOLDER VPr51**

In the article some peculiar structure features and properties of the amorphous tape solder on the basis of the nickel alloy (VPr51) are provided. The solder engineered for the thin-walled structural component brazing made from stainless steels and nickel-based alloys. Some data related to the solder alloy composition, its brazing conditions (i. e. temperature and delay time), technological properties (flowing and wetting), erosive activity to the stainless steels and strength characteristics of soldered joints are brought here in the article as well.

Keywords: amorphous tape solder material, thin-walled structural component, brazing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Высокотемпературная пайка тонкостенных элементов конструкций, выполненных из коррозионностойких сталей и сплавов на основе никеля, является относительно сложным технологическим приемом [1–3]. В данном случае приходится сталкиваться с рядом трудностей, связанных, с одной стороны, с необходимостью обеспечения высокого уровня смачиваемости материалом припоя поверхностей соединяемых элементов конструкции, а с другой – такого рода взаимодействие должно быть ограничено зоной диффузионного взаимодействия, которая, в свою очередь, должна быть достаточной для обеспечения требуемого уровня прочностных характеристик паяного соединения. Кроме требований к природной сущности припоя, его физико-химическим свойствам, задаваемым, прежде всего, химическим составом, крайне важным является решение вопросов о равномерной и точно задаваемой дозировке припоя и исключении образования пористости в зоне паяного шва из-за, например, использования полимерного связующего в случае лент, получаемых из порошкового припоя [4]. Одним из

полуфабрикатов припоев, применяемых для высокотемпературной пайки, сочетающим высокую степень структурно-химической однородности при прецизионно задаваемой толщине, а следовательно, обеспечивающим точную дозировку, является припой в виде быстрозакаленных лент. В этой связи перспективно использование ленточного припоя марки ВПр51, предназначенного для пайки тонкостенных элементов конструкций авиационной техники (теплообменники, сотовые конструкции), выполненных из коррозионностойких сталей и сплавов на основе никеля [5].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.9. «Припои и технологии высокотемпературной диффузионной пайки», в части разработки припоев и технологии высокотемпературной диффузионной пайки жаропрочных металлических материалов нового поколения («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

Аморфные металлические ленточные припои на основе никеля обладают уникальными физико-химическими свойствами: идеальной структурной и химической однородностью, равнотолщинностью, пластичностью при многократном изгибе [6–11]. Кроме обеспечения возможности получения высокотемпературного припоя в виде быстрозакаленных лент, т. е. склонности к образованию необходимого для обеспечения основных технологических свойств полуфабриката припоя количества аморфной фазы [12, 13], его состав также должен удовлетворять целому ряду требований: обладать физико-химическими свойствами, обеспечивающими необходимый уровень смачиваемости и растекаемости, а также низкой эрозионной активностью по отношению к основному материалу [5, 14–16]. В итоге полученная композиция, будучи полученной в виде аморфной (быстрозакаленной) ленты, может найти свое применение уже в качестве армирующего элемента композиционного материала [17] или войти в состав материалов функционального назначения [18].

В настоящее время перспективным направлением в области разработки композиций припоев, предназначенных для пайки тонкостенных элементов конструкций из нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов, является создание припоев на основе никеля. Задача повышения жаропрочности (способности материала выдерживать высокие напряжения при температурах эксплуатации) паяных соединений решается благодаря сложному легированию припоев и проведению длительной термической обработки соединений. Наиболее часто применяют хром, обеспечивающий жаростойкость (способность сопротивляться химическому разрушению поверхности в условиях эксплуатации) и стойкость к высокотемпературной солевой коррозии (ВСК), которая наиболее опасна в температурном диапазоне 760–1000°C. Введением в припой таких элементов, как молибден, вольфрам, тантал, алюминий и титан, достигают повышения жаропрочности; введением кобальта – пластичности паяных соединений. Молибден, вольфрам и тантал предназначены для твердорастворного, а алюминий и титан – для дисперсионного упрочнения. По этому принципу созданы многие отечественные и зарубежные припои, такие, например, как ВПр24 и др. Особый интерес представляют эвтектические сплавы, обладающие низкой температурой ликвидус, высокой жидкотекучестью, которые хорошо смачивают поверхность паяемых материалов и менее склонны к образованию ликваций и усадочных пор. Никелевые припои типа ВNi-2, ВNi-3, ВNi-4 используются при пайке элементов конструкций из жаропрочных, жаростойких коррозионностойких материалов, работающих при температурах вплоть до 1000°C, и состоят обычно из эвтектик состава «никель–бор» или «никель–кремний–бор», которые, как правило, характеризуются высокой эрозионной активностью (что обусловлено высоким содержанием бора: 2,5–3,5%), которая обусловлена низкой температурой эвтектики «никель–бор» и высокой диффузионной подвижностью бора.

Решение задачи создания экономнолегированного припоя на основе никеля, сочетающего сниженную температуру пайки с низкой эрозионной активностью материала

припоя по отношению к соединяемым материалам, а также позволяющего получать такой припой в виде аморфной ленты, сводится к определению входящих в его состав элементов и их содержанию, т. е. существование припоя в виде аморфной ленты определяется его химическим составом [18]. В состав припоя, содержащего такие традиционные для жаропрочных припоев на основе никеля элементы, как хром, кобальт, молибден, ниобий, титан, дополнительно вводят железо, марганец, а также кремний и бор. С помощью введения в сплав дополнительных компонентов обеспечивается необходимый уровень значений жаростойкости припоя и паяных соединений на уровне значений жаростойкости не ниже основного материала. Сравнительно низкое содержание хрома и молибдена в совокупности с введением бора позволяет существенно ($<1100^{\circ}\text{C}$) снизить температуру пайки, обеспечить низкую эрозионную активность припоя и, как показали испытания, описанные далее, не сказывается на уровне жаростойкости и прочности паяных соединений. Оптимальным сочетанием содержания железа и кобальта также достигается уменьшение растворения паемого материала, повышение прочности, пластичности и снижение способности к охрупчиванию паяных соединений при хорошем уровне смачиваемости. Введением титана, который является сильным раскислителем сплавов, в совокупности с наличием в сплаве ниобия достигается необходимый уровень жаропрочности, обусловленный образованием тугоплавких соединений (боридов и силицидов) на их основе. Марганец введен в состав припоя для обеспечения необходимой смачиваемости и растекаемости припоя по поверхности паемого материала. Кроме того, этот элемент позволяет снизить температуру плавления, что в совокупности обеспечивает высокий уровень прочностных характеристик паяных соединений.

Материалы и методы

Оценку свойств припоя производили на основании изучения особенностей его поведения при пайке тонкостенных элементов конструкций, выполненных из коррозионностойкой стали марки 12X18H10T. В данном случае важным является подбор оптимальных режимов пайки – температуры и продолжительности выдержки, которые определяют взаимодействие материала припоя с материалом соединяемых деталей.

Для этой цели проведена серия экспериментов с последовательным изменением температуры пайки образцов в вакууме, состоящих из пластин паемого материала с размещенным на их поверхности пакетом из нескольких слоев аморфного припоя. Перед пайкой поверхность пластин тщательно зачищали шлифовальной бумагой номеров 200, 400 и 600 с доведением поверхности полировкой шлифовальной бумагой с зерном 0,63 мкм. Затем поверхность обрабатывали смесью бензина и спирта в соотношении 3:1 (объемных частей). Количество припоя оценивали по толщине используемых лент припоя. Так, для припоя марки ВПр51 проведена пайка по следующим режимам: температура варьировалась от 1050 до 1160 $^{\circ}\text{C}$, выдержка при температуре пайки составляла 15 мин. В ходе эксперимента контролировали следующие параметры: смачиваемость, которую оценивали по углу смачивания; растекаемость, которую, в свою очередь, измеряли по диаметру капли на поверхности пластины, а также степень эрозионного взаимодействия материала припоя с паемым материалом. На основании проведенных экспериментов для припоя марки ВПр51 выбран следующий режим пайки: температура 1040–1050 $^{\circ}\text{C}$, выдержка 15 мин.

В случае изготовления образцов для определения напряжения сдвига, нахлестка составляла 1,0–1,5 толщины листовой заготовки. Это продиктовано тем, что при большей величине нахлестки разрушение (особенно при испытаниях при повышенной температуре) происходит по основному материалу. При увеличении площади нахлестки в процессе испытаний также происходит изгиб нахлесточной части паяных образцов. Такого рода деформация образцов, имеющая место до его разрушения, нежелательна. По этой причине величину нахлестки поддерживали в указанных ранее пределах.

Для определения предела прочности паяного соединения изготовили стандартные образцы для испытаний с диаметром рабочей зоны 5 мм из прутковой заготовки коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т.

Определение прочностных характеристик проводили на испытательных машинах Instron (Англия), FPZ-100/1 (Германия) при комнатной (20°C) и повышенной температуре (600°C).

Способность припоя заполнять зазоры малой величины под действием капиллярных сил, называемую капиллярностью, проверяли следующим образом. На поверхность пластины из коррозионностойкой стали указанной марки укладывали пластину прямоугольной формы из стали той же марки, но меньшего размера и закрепляли фольгой из коррозионностойкой стали посредством точечной сварки. Строго контролировали зазор (на свету) между пластинами, который не превышал 50 ± 5 мкм. Затем у кромки второй пластины устанавливали пакет аморфного ленточного припоя. Далее проводили пайку по выбранному на этапе определения смачиваемости и растекаемости режиму и изготавливали продольный шлиф, по которому определяли степень заполнения припоем заданного зазора, – тем самым подтверждалась смачиваемость паяемого материала припоем и дополнительно оценивалась величина эрозионного взаимодействия материала припоя с соединяемым материалом (рис. 1).

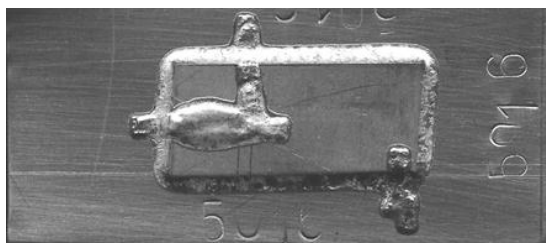


Рис. 1. Проба на капиллярность припоя марки ВПр51

При металлографическом исследовании микрошлифов паяных соединений установлено следующее: степень эрозии материалом припоя ВПр51 не превышает 2–3%, припой образует малые углы смачивания и хорошо заполняет капиллярный зазор (рис. 2).

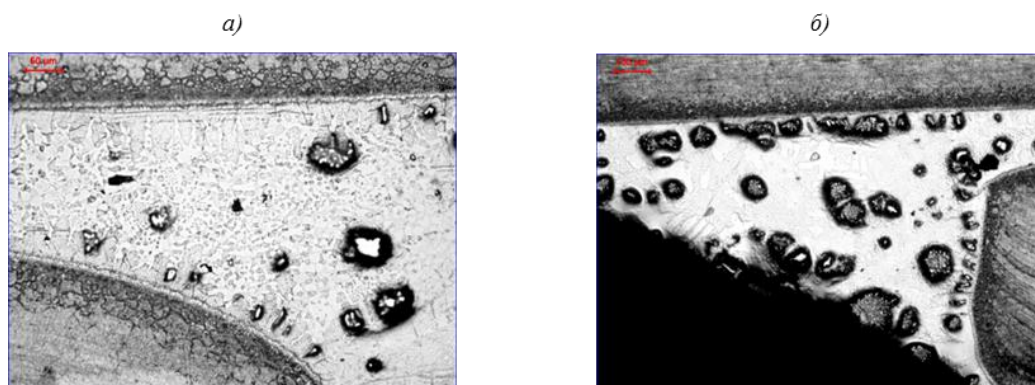


Рис. 2. Входная (а – $\times 100$) и выходная (б – $\times 200$) галтели паяного шва образца из коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т

Установлено также, что в паяном шве с зазором 90–100 мкм (рис. 3) образована доэвтектическая структура, имеющая включения темного цвета. Шов состоит из гамма-твердого раствора, эвтектики и темных включений (рис. 4, а). По мере уменьшения зазора (шов толщиной 50 мкм) эвтектика сначала становится прерывистой (рис. 4, б), а затем вырождается. При величине зазора, равной 40 мкм, шов состоит только из гамма-твердого раствора (рис. 4, в).



Рис. 3. Паяный шов ($\times 200$) со стороны входной галтели с зазором 90–100 мкм

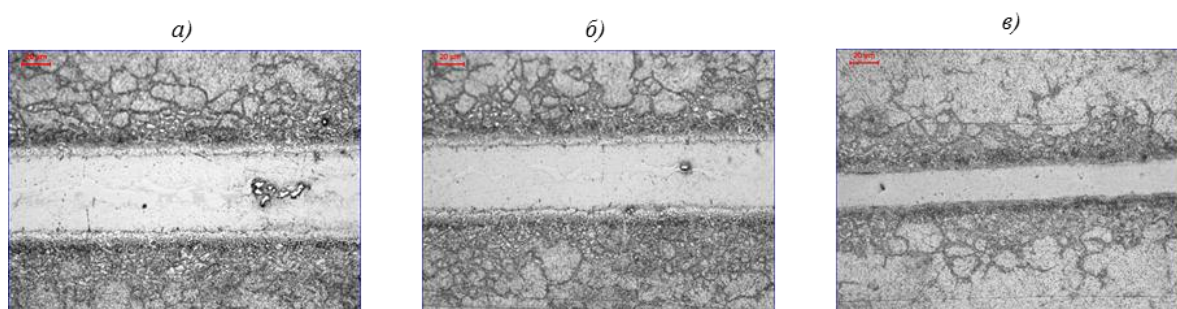


Рис. 4. Изменение микроструктуры ($\times 500$) паяного соединения по шву (а–в)

Результаты и обсуждение

Для пайки образцов для определения механических характеристик (пределов прочности при срезе или сдвиге, предела прочности при растяжении) использованы приведенные ранее режимы пайки. Так, для образцов из коррозионностойкой стали марки 12X18H10T для испытания на срез и определения предела прочности выбран следующий режим: температура 1040–1050°C с выдержкой 15–20 мин и охлаждением с печью до 100°C в вакууме. Пайку проводили в вакуумной печи типа СНВ, контроль температуры осуществляли при помощи вольфрамово-рениевой термопары с фиксированием значений на цифровом вольтметре.

При испытании образцов из коррозионностойкой стали, паянных припоем марки ВПр51, получены следующие результаты (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Результаты механических испытаний на срез образцов из коррозионностойкой стали марки 12X18H10T толщиной 1,5 мм, паянных припоем марки ВПр51 (аморфная лента) на основе никеля

Условный номер образца	Геометрические размеры нахлестки		Площадь нахлестки, мм ²	Нагрузка при разрушении, кН	Предел прочности, МПа
	ширина, мм	длина, мм			
Температура испытания 20°C					
1	9,35	0,95	8,88	5,02	554
2	9,55	0,97	9,26	5,39	570
3	9,67	0,93	8,99	4,69	512
Температура испытания 600°C					
4	9,55	0,97	9,26	3,20	339
5	9,8	0,93	9,11	3,11	334
6	9,7	0,95	9,23	3,16	335
7	9,8	0,94	9,21	3,18	338

Результаты механических испытаний на растяжение образцов, паянных встык припоем марки ВПр51 (аморфная лента) на основе никеля

Условный номер образца	Диаметр образца, мм	Нагрузка при разрушении, кН	Предел прочности, МПа
Температура испытания 20°С			
1	4,96	1185	601
2	4,97	1136	574
3	4,95	1168	595
Температура испытания 600°С			
4	4,97	587	297
5	4,97	520	263
6	4,97	602	304

Следует отметить, что полученные при комнатной температуре значения прочности паяного соединения при испытании на срез и при определении предела прочности при растяжении находятся на уровне значений прочности для основного материала – коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т. При повышенной температуре (600°С) прочность паяного соединения составила 75–80% от прочности основного материала, что является допустимым при применении пайки для несущих элементов тонкостенных конструкций (сотовых панелей, ЗПК, теплообменников). Для сравнения приведем справочные данные. Так, предел прочности при растяжении стали данной марки составляет 610–647 МПа для прутков и образцов в виде листовой заготовки в состоянии поставки при комнатной температуре. В отожженном состоянии прочность снижается до уровня 510–539 МПа. При температуре 600°С прочность основного материала составляет 392 МПа.

Приведенные в табл. 1 и 2 сниженные значения предела прочности паяного соединения при повышенной температуре в сравнении со значением предела прочности основного материала, по-видимому, могут быть объяснены наличием в зоне разрушения областей с крупнозернистой структурой, в которой имеют место зоны термического влияния.

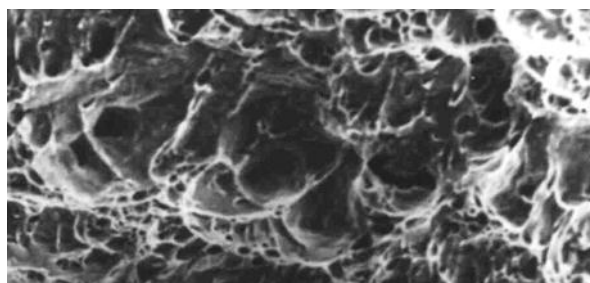


Рис. 5. Поверхность излома образца при испытании на срез (×500)

При изучении характера разрушения образцов из коррозионностойкой стали установлено наличие пластичного характера разрушения, о чем свидетельствует мелкоямочный рельеф (рис. 5), с образованием незначительного удлинения образца и разрушением по галтели паяного шва образцов для определения предела прочности и по поверхности нахлестки образцов для определения прочности на срез при 20 С (при минимально допустимой нахлестке).

Заключения

Припой ВПр51 в виде аморфных лент – благодаря своим свойствам, таким как смачиваемость, растекаемость, капиллярность – позволяет ограничить эрозию основного материала на уровне 3–5% при сниженной до 1040–1080°С температуре пайки. При пайке тонкостенных элементов конструкций из коррозионностойких сталей значения прочности

паяного шва при его испытании на срез составили $\sim(510-570)$ и $\sim(330-340)$ МПа при 20 и 600°C соответственно. Предел прочности образцов, паянных встык, составил $\sim(575-600)$ и $\sim(260-300)$ МПа при 20 и 600°C соответственно. Фрактографический анализ изломов паяных образцов показал мелкоячеистую структуру поверхности разрушения, характерную для пластичного излома. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и перспективности применения припоя марки ВПр51 для пайки тонкостенных элементов, выполненных из коррозионностойких сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Столянков Ю.В., Лукин В.И., Рыльников В.С. Аморфные металлические припои // Тез. докл. межотр. науч.-практич. конф. «Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли в XXI веке». М.: ВИАМ, 2002. С. 48–49.
4. Лукин В.И., Столянков Ю.В., Рыльников В.С., Щербаков А.И. Пайка аморфными припоями // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. №4. С. 96–102.
5. Лукин В.И., Рыльников В.С., Столянков Ю.В., Щербаков А.И. Быстрозакаленные жаропрочные припои на основе титана и никеля // Тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. «Актуальные вопросы авиационного материаловедения» М.: ВИАМ, 2007. С. 25–26.
6. Физикохимия аморфных (стеклообразных) металлических материалов / под ред. Ю.К. Ковнеристого. М.: *Металлургия*, 1987. 328 с.
7. Аморфные металлические материалы. М.: *Наука*, 1984. 158 с.
8. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. М.: *Металлургия*, 1987. 328 с.
9. Ковнеристый Ю.К., Осипов Э.К., Трофимова Е.А. Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов. М.: *Наука*, 1983. 145 с.
10. Аморфные металлические сплавы. Пер. с англ. / под ред. Ф.Е. Люборского. М.: *Металлургия*, 1987. 584 с.
11. Полк Д.Е., Гиссен Б.К. Металлические стекла. Пер. с англ. М.: *Металлургия*, 1984. С. 12–39.
12. Столянков Ю.В., Алексахин В.М., Антюфеева Н.В. К вопросу об оценке склонности металлических систем к стеклообразованию (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №7. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2017). DOI: dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2015-0-7-8-8.
13. Столянков Ю.В., Алексахин В.М., Антюфеева Н.В., Щеглова Т.М. Оценка стеклообразующей способности металлической системы на основе никеля типа «металл–металлоид» // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 66–71. DOI: 10.185.77/2071-9140-2016-0-1-66-71.
14. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Лукин В.И., Рыльников В.С. Высокотехнологичные полуфабрикаты жаропрочных припоев (ленты и пасты на органическом связующем) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №9. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2017).
15. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практич. конф. «Сварка и безопасность». Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.
16. Рыльников В.С., Лукин В.И. Припои, применяемые для пайки материалов авиационного назначения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №8. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2017).
17. Столянков Ю.В., Антюфеева Н.В., Раскутин А.Е., Каримова С.А. Исследование возможности создания слоистых металлополимерных композиционных материалов с использованием тонколистовых аморфных сплавов // *Композиты и наноструктуры*. 2014. Т. 6. №1. С. 25–31.
18. Столянков Ю.В., Гуляев И.Н., Алексахин В.М., Антюфеева Н.В. Аморфные металлические материалы в составе пьезоэлектрических слоистых элементов-актюаторов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №4. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-3-3.