

Моделирование процесса сварки давлением жаропрочного никелевого сплава с использованием ультрамелкозернистой прокладки

Валитова Э.В.[†], Ахунова А.Х.[‡], Валитов В.А., Дмитриев С.В.,
Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х.

[†]valitova_elvina_v@mail.ru, [‡]akhunova.a.a@gmail.com

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Хатурина 39, 450001, Уфа

Приведены данные сравнительного анализа результатов физического и компьютерного моделирования процесса сварки давлением крупнозернистого жаропрочного никелевого сплава ХН58МБЮД через ультрамелкозернистую прокладку. По результатам численного моделирования напряженного деформированного состояния показано, что значения деформаций достигают своих максимальных значений в периферийной зоне твердофазного соединения (ТФС). В этой зоне, в ультрамелкозернистой прослойке развивается локализованная низкотемпературная (850°C) сверхпластическая деформация, что способствует образованию качественного ТФС. Проведен анализ влияния толщины прослойки на однородность распределения напряжений и деформаций в зоне ТФС.

Ключевые слова: сварка давлением, жаропрочный никелевый сплав, крупнозернистый сплав, ультрамелкозернистая прокладка, метод конечных элементов.

Modeling of heat-resistant nickel alloy pressure welding using ultrafine grained gasket

E.V. Valitova, A.Kh. Akhunova, V.A. Valitov, S.V. Dmitriev,
R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Muhametrahimov

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin st. 39, 450001, Ufa

Comparative analysis of the results of physical and computer modeling of pressure welding of coarse-grained HN58MBYUD heat-resistant nickel alloy using ultrafine-grained gasket is presented. According to the results of numerical simulation of the stress strain state, maximal values of strain are observed in the periphery of the solid phase bonding (SPB) zone. In this zone, ultrafine-grained interlayer undergoes low-temperature (850°C) localized superplastic deformation, which promotes the formation of a high-quality SPB. The effect of the gasket thickness on the uniformity of stress and strain distributions in the SPB zone is analyzed.

Keywords: pressure welding, heat-resistant nickel alloy, coarse-grained alloy, ultrafine-grained gasket, finite element method.

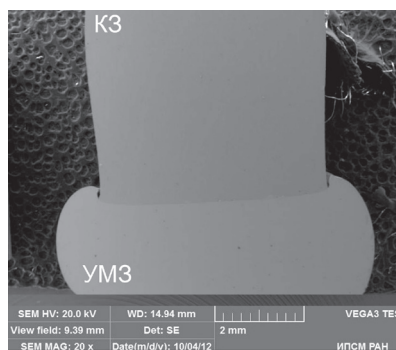
1. Введение

Современные технологии изготовления конструкций, применяемых в авиационном и космическом строении, используют практически все виды сварки. Использование сварных конструкций приводит к экономии металла и к более рациональной форме конструкций, при этом стыки в конструкциях выполняются без вспомогательных элементов, утяжеляющих изделия.

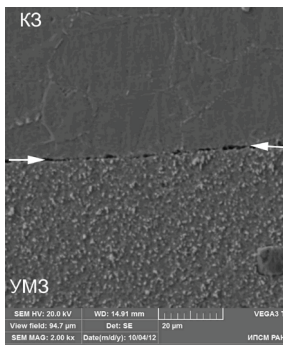
Одним из широко используемых способов сварки металлов является сварка давлением (СД) в твердофазном состоянии. Основными параметрами, влияющими на качество твердофазного соединения (ТФС), являются: температура, прижимающее давление, время выдержки, степень пластической деформации в зоне соединения и

качество свариваемых поверхностей [1-7]. Характерной особенностью сварки давлением является образование физического контакта в результате микропластической деформации контактных поверхностей [3,4]. С помощью СД реализуются соединения таких металлов и сплавов, которые невозможно сварить другими способами, например, титана с алюминием, стали с чугуном и др. В случае недостаточно интенсивной диффузии между соединяемыми разнородными материалами при резко различных коэффициентах линейного расширения или при возможном появлении хрупких соединений между ними целесообразно применять промежуточную прокладку [8]. По технологическому исполнению наиболее часто прокладки применяются в виде фольг толщиной от 10 до 240 мкм, или гальванических покрытий толщиной от 4 до 60 мкм.

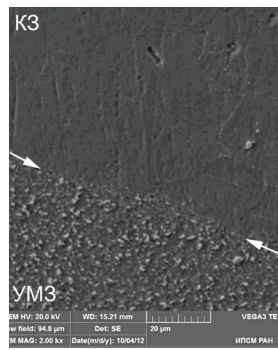
Представляют интерес результаты работы [8], в которой исследован процесс развития деформации титановых прослоек с пластинчатой структурой, находящихся между заготовками из сплава с глобулярной (равноосной мелкозернистой) структурой в условиях диффузионной сварки. По-видимому, такое сочетание структур прослойки и свариваемых заготовок обусловлено эксплуатационными требованиями, которые предъявляются к сварной конструкции. В тоже время, возможно соединение заготовок из титанового сплава, имеющих крупнозернистую пластинчатую структуру, с помощью прокладки с глобулярной мелкозернистой структурой, в которой при сварке давлением развивается сверхпластическая деформация, что создает благоприятные условия для формирования беспористого ТФС. При этом следует отметить, что применение нанокристаллической прокладки, например, из наноструктурного сплава ВТ6, позволяет реализовать эффект низкотемпературной сверхпластичности, что на 200-300°C ниже, чем при сварке давлением через ультрамелкозернистую (УМЗ) прокладку. В литературе имеется ограниченное число работ, в которых рассмотрена возможность применения УМЗ прокладок [9,10] при сварке давлением жаропрочных никелевых сплавов в условиях низкотемпературной сверхпластичности. Также не ясно каким образом влияет толщина таких прокладок на развитие сверхпластической деформации и формирование ТФС. В этой связи, целью настоящей работы является исследование методами физического и численного моделирования влияния УМЗ прокладки и ее толщины на формирование ТФС при сварке давлением жаропрочного никелевого сплава ХН58МБЮД в условиях низкотемпературной сверхпластичности.



а



б



в

Рис. 1. ТФС образцов КЗ+УМЗ сплава ХН58МБЮД после сварки давлением при температуре 800°C: (а) общий вид и (б, в) локальные участки соединения.

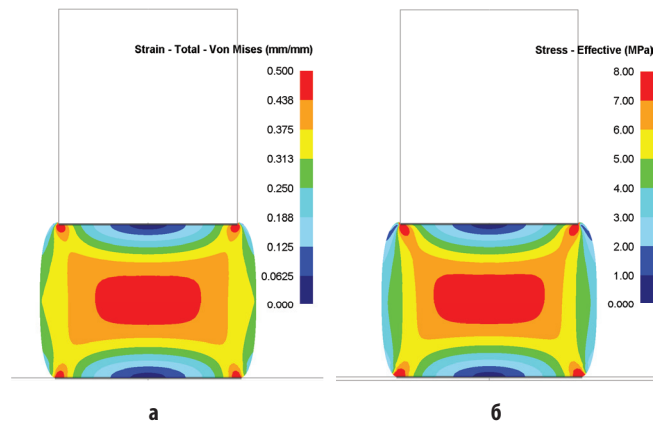


Рис. 2. Результаты конечноэлементного моделирования сварки давлением образцов: распределение (а) интенсивности деформаций, (б) интенсивности напряжений.

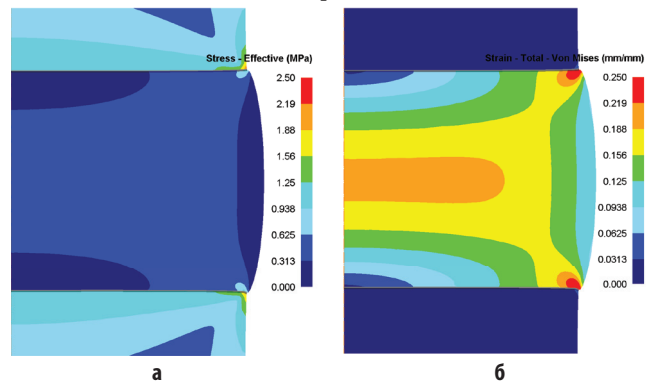


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние при сварке давлением КЗ образцов с использованием НК прокладки толщиной 2,7 мм: (а) распределение интенсивности напряжений, (б) распределение интенсивности деформации.

2. Результаты физического и конечноэлементного моделирования

На рис.1 приведены результаты экспериментов по сварке давлением образцов с крупнозернистой (КЗ) и УМЗ структурой в температурных условиях низкотемпературной сверхпластичности сплава ХН58МБЮД. Сравнительный анализ механических свойств сплава ХН58МБЮД в двух структурных состояниях показал, что напряжение течения УМЗ материала при одноосном сжатии при температуре 800°C со скоростью 10^{-4} c^{-1} составляет 100 МПа, что существенно ниже чем у сплава ХН58МБЮД в КЗ состоянии (700 МПа). Поэтому неудивительно, что при сварке давлением образцов из исследуемого сплава в структурных сочетаниях КЗ+УМЗ пластическая деформация развивается преимущественно в УМЗ материале. Было установлено, что в центральной зоне ТФС поверхность соединения сохраняет перпендикулярное расположение относительно оси приложенной нагрузки. Эта зона характеризуется высокой долей относительной протяженности пор (до 80%) В тоже время в периферийных зонах, т.е. вблизи боковой поверхности соединяемых сваркой образцов, наблюдаются участки, в которых плоскость ТФС наклонена относительно оси деформации. В этих зонах сформировано более качественное ТФС, о чем свидетельствует малая

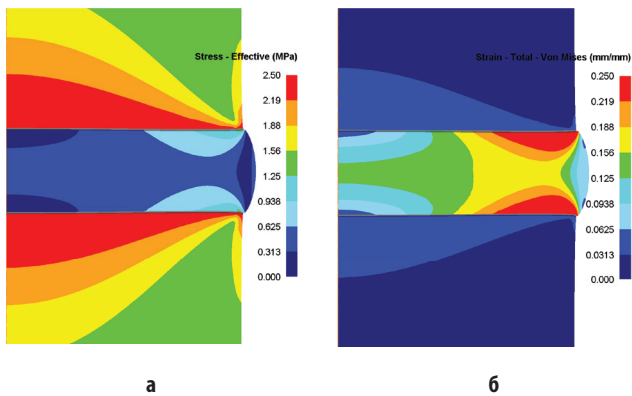


Рис. 4. То же, что и на рис.3, но для толщины прокладки 1 мм.

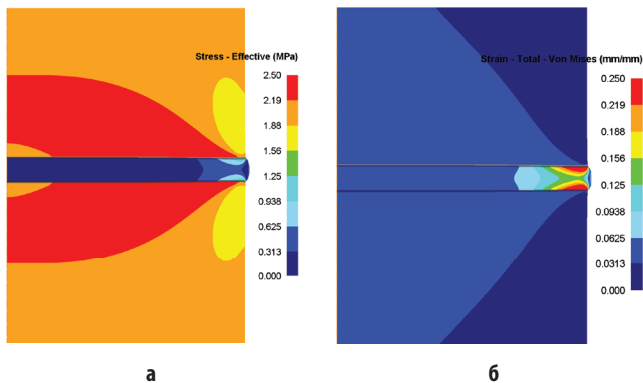


Рис. 5. То же, что и на рис.3, но для толщины прокладки 0,27 мм.

относительная протяженность пор, не превышающая 15% [5]. Аналогичные результаты были получены при сварке давлением разнородных жаропрочных сплавов. Такое неоднородное формирование ТФС по сечению сварных образцов обусловлено, по-видимому, неоднородностью напряженно-деформированного состояния, характерного для схемы одноосного сжатия.

Действительно, из результатов компьютерного моделирования, представленных на рис.2, следует, что максимальная степень деформации вблизи достигается в периферийной зоне контактной поверхности, а в центральной зоне она минимальна, т.е. формируется застойная область деформации. Образование ТФС в центральной зоне затруднено и поэтому плотность пор там максимальна. В тоже время, в периферийной зоне ТФС, где значения напряжений достигают максимума, становится возможным сверхпластическое течение, что является причиной возникновения наклонных участков и минимальной плотности пор, наблюдаемых в эксперименте.

Отличие компьютерного моделирования от экспериментального заключается в том, что при моделировании образец с КЗ структурой наделялся свойствами абсолютно твердого тела и не испытывал деформации. В то же время, физические эксперименты показывают, что образцы с КЗ структурой при сварке давлением претерпевают небольшую деформацию, составляющую от 3 до 5%. Это объясняется тем, что в областях концентрации напряжений в периферийной зоне, величина напряже-

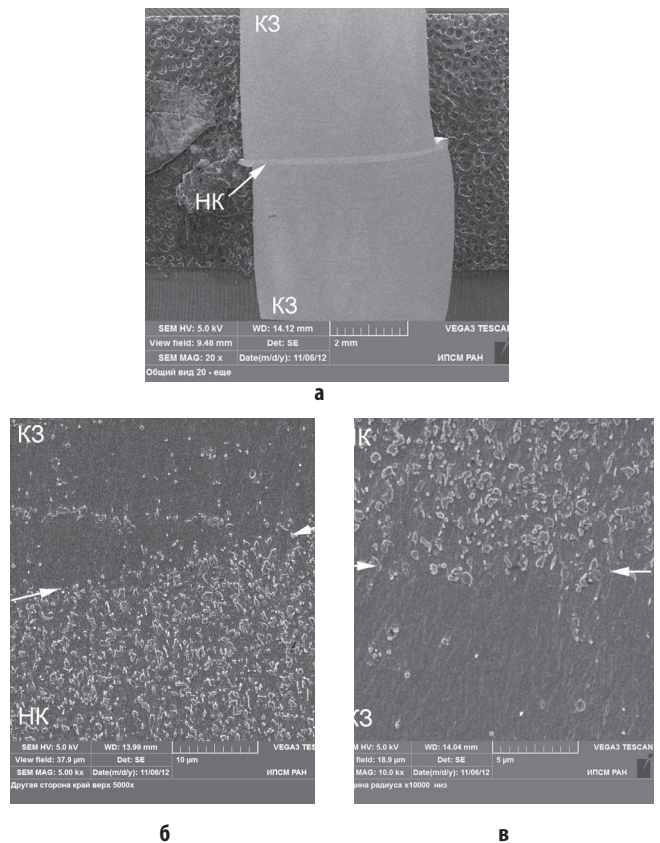


Рис. 6. ТФС образцов КЗ+НК+КЗ сплава ХН58МБЮД после сварки давлением при температуре 800°C: (а) общий вид, (б, в) локальные участки.

ния может превысить напряжение течения материала с крупнозернистой структурой и, следовательно, пластическая деформация может развиваться не только в УМЗ, но и в КЗ материале. Данное предположение подтверждается экспериментально, наличием наклонных участков в периферийных зонах, которые образовались в результате совместной деформации крупнозернистого и УМЗ образцов.

Предположив наличие плоскости симметрии, результаты численного моделирования, приведенные на рис.2, можно применить к СД двух крупнозернистых образцов через толстую УМЗ прослойку. Можно предположить, что уменьшение толщины прослойки, а также уменьшение среднего размера зерен прокладки до наноразмерного, должно существенным образом изменить напряженно-деформированное состояние в зоне ТФС.

На рис.3-5 показаны результаты моделирования напряженно-деформированного состояния в процессе СД образцов с КЗ структурой с использованием нанокристаллической (НК) прокладки для различных толщин прокладки. Подобный физический эксперимент проводился при соединении двух КЗ образцов из сплава ХН58МБЮД через НК прокладку толщиной 0,27 мм. При моделировании значение толщины прокладки составило 2,7; 1 и 0,27 мм (рис.3-5, соответственно), что в 1,8; 5 и 18 раз меньше высоты свариваемых образцов с КЗ структурой.

По результатам моделирования (рис.3-5) видно, что напряженно-деформированное состояние в зоне

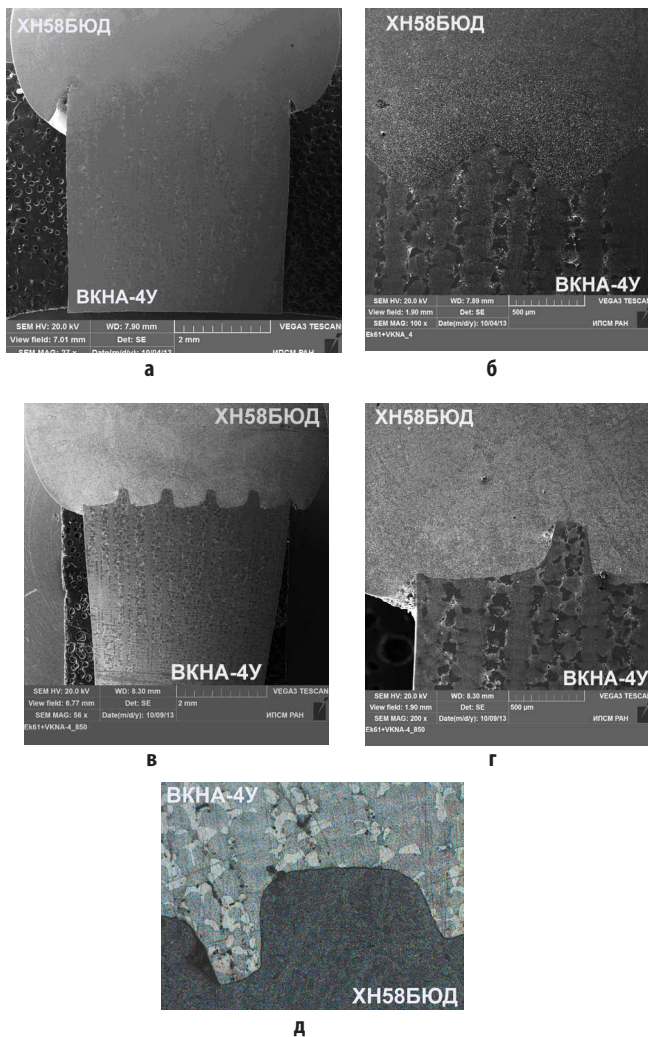


Рис. 7. ТФС образцов из сплавов ХН58МБЮД и ВКНА-4У после сварки давлением при температуре 850°C: (а, в) общий вид и (б, г, д) локальный участок соединения.

ТФС существенным образом зависит от толщины прокладки. При сварке давлением КЗ образцов через НК прокладку толщиной 2,7 мм картина напряженно-деформированного состояния (рис.3) во многом аналогична полученной для сварки КЗ+УМЗ образцов, приведенной на рис.2. С уменьшением толщины НК прокладки до 1 мм можно наблюдать, что в центре прокладки интенсивность напряжений по всей ее толщине (рис.4а) соответствует уровню напряжений, характерному для зоны затрудненной деформации (см. рис.3а, в приторцевой зоне). То есть можно сказать, что при толщине прослойки 0,27 мм имеет место слияние верхней и нижней приторцевых застойных зон затрудненной деформации. Поэтому не удивительно, что пластической деформации подвергаются преимущественно периферийные зоны, расположенные на расстоянии более половины радиуса сварных образцов. При минимальной толщине прослойки 0,27 мкм зона затрудненной деформации охватывает практически весь объем прокладки, о чем свидетельствует характер распределения напряжений в прослойке (рис.5а). Вероятно поэтому, как видно на рис.5б, макси-

мальные значения пластической деформации наблюдаются в периферийных участках прослойки вблизи боковой поверхности свариваемых образцов.

Представляло интерес сравнение приведенных выше результатов численного моделирования с результатами экспериментов, где была осуществлена сварка давлением образцов с КЗ структурой через НК прослойку толщиной 0,27 мкм. В центральной зоне соединений степень деформации минимальна и составляет 5%, но ее значение возрастает до 50% в периферийной зоне (рис.6). Относительная протяженность пор даже в центральной зоне не велика и не превышает 15%. Высокое качество сварки, по-видимому, обусловлено относительным сдвигом свариваемых КЗ образцов, что привело к значительной сдвиговой деформации НК прокладки (см. рис.6а).

На основании анализа результатов по пластической деформации при сварке давлением образцов из сплава ХН58МБЮД в сочетании КЗ-НК-КЗ было показано, что деформация локализуется преимущественно в НК прослойке, которая является более пластичной в отличие от соединяемых образцов с КЗ структурой. При этом, имеет место неоднородная пластическая деформация прослойки, развивающаяся преимущественно в ее периферийной зоне, что полностью согласуется с результатами компьютерного моделирования (рис.3-5).

Итак, вышеприведенные результаты анализа напряженно-деформированного состояния в зоне ТФС при СД по схеме одноосного сжатия свидетельствуют о том, что в центральной зоне ТФС развитие пластической деформации затруднено. Поэтому для формирования более благоприятного напряженно-деформированного состояния в зоне ТФС целесообразным является создание на сварной поверхности крупнозернистых образцов определенного рельефа, чтобы по всей свариваемой поверхности могла бы развиваться сверхпластическая деформация.

На рис.7 показаны результаты эксперимента по сварке УМЗ сплава ХН58МБЮД и КЗ интерметаллидного сплава ВКНА-4У на основе Ni_3Al . На поверхность КЗ интерметаллидного сплава ВКНА-4У наносился рельеф. Как видно из рис.7, за счет развития низкотемпературной сверхпластической деформации в УМЗ сплаве ХН58МБЮД достигается практически полное заполнение углублений на поверхности образца из интерметаллидного сплава ВКНА-4У, и, как результат, обеспечивается СД разнородных никелевых сплавов.

3. Заключение

В работе показано, что данные численного моделирования по сварке давлением жаропрочных никелевых сплавов, в том числе через НК прослойку, хорошо согласуются с результатами физических экспериментов. Исходя из полученных результатов, представляется целесообразным дальнейшее изучение методами численного моделирования влияния геометрии свариваемой поверхности на напряженно-деформированное

состояние в зоне ТФС однородных и разнородных жаропрочных никелевых сплавов. Полученные результаты и их развитие в дальнейшем позволят оптимизировать технологические параметры процесса сварки давлением в условиях сверхпластичности разнородных жаропрочных никелевых сплавов. Проведение таких исследований весьма актуально, поскольку они позволят создать существенный научно-технический задел, необходимый для разработки новой инновационной технологии для изготовления деталей из жаропрочных никелевых сплавов, например, деталей типа «блиск» для авиадвигателей 5 поколения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-08-12200\14 и регионального гранта Поволжье № 14-08-97061 р_поволжье_а.

Литература

1. R. V. Safiullin. Letters on Materials. **2** (1), 32 (2012). (in Russian) [Р. В. Сафиуллин. Письма о материалах. **2** (1), 32 (2012).]
2. R. V. Safiullin. Letters on Materials. **2** (1), 36 (2012). (in Russian) [Р. В. Сафиуллин. Письма о материалах **2** (1), 36 (2012).]
3. R. Ya. Lutfullin. Letters on Materials. **1** (1), 59 (2011). (in Russian) [Р. Я. Лутфуллин. Письма о материалах. **1** (1), 59 (2011).]
4. R. Ya. Lutfullin. Letters on Materials. **1** (2), 88 (2011). (in Russian) [Р. Я. Лутфуллин. Письма о материалах. **1** (2), 88 (2011).]
5. A. K. Bulkov, V. V. Peshkov, V. R. Petrenko, D. N. Balbekov, A. I. Stryguin. Welding International. **28**, 222 (2014). (in Russian) [А. К. Булков, В. В. Пешков, В. Р. Петренко, Д. Н. Балбеков А. И. Стрыгин. Сварочное производство. **66** (3), 15 (2013).]
6. A. B. Bulkov, S. V. Safonov, D. N. Balbekov, V. R. Petrenko, V. V. Peshkov. Welding International. **28**, 54 (2014). (in Russian) [А. Б. Булков, С. В. Сафонов, Д. Н. Балбеков, В. Р. Петренко, В. В. Пешков. Сварочное производство. **66** (1), 14 (2013).]
7. V. V. Peshkov, A. B. Bulkov, S. V. Safonov, V. R. Petrenko, D. N. Balbekov, L. S. Kireyev. Welding International. **27**, 980 (2013). (in Russian) [В. В. Пешков, А. Б. Булков, С. В. Сафонов, С. В. Сафонов, В. Р. Петренко, Д. Н. Балбеков, Л. С. Киреев. Сварочное производство **65** (12), 23 (2012).]
8. A. B. Bulkov, V. V. Peshkov, D. N. Balbekov, S. M. Nebolsin, G. V. Maltsev. Welding International. **28**, 900 (2014). (in Russian) [А. К. Булков, В. В. Пешков, Д. Н. Балбеков, С. М. Небольсин, Г. В. Мальцев. Сварочное производство. **66** (11), 24 (2013).]
9. E. V. Valitova, R. Y. Lutfullin, M. K. Mukhametrakhimov, V. A. Valitov. Perspektivnye Materialy N15, 35 (2013) (in Russian). [Э. В. Валитова, Р. Я. Лутфуллин, М. Х. Мухаметрахимов, В. А. Валитов. Перспективные материалы. **15**, 35 (2013).]
10. V. A. Valitov. Letters on Materials. **3** (1), 50 (2013). (in Russian) [В. А. Валитов. Письма о материалах. **3** (1), 50 (2013).]