

Модифицирование поверхности прослойки никеля для делокализации деформации при сварке давлением образцов титанового сплава и нержавеющей стали

Р. Г. Хазгалиев^{1†}, М. Ф. Имаев¹, Р. Р. Мулюков^{1,2}, Ф. Ф. Сафин³

[†]sloth-usatu@mail.ru

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

²Башкирский государственный университет, ул. Заки Валиди 32, 450076, Россия

³Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К. Маркса 12, Уфа, 450000, Россия

Исследовали равномерность деформации в зоне соединения при сварке давлением образцов титанового сплава ПТЗВ и нержавеющей стали 12Х18Н10Т через никелевую прослойку. Показано, что в случае плоских поверхностей соединяемых образцов в центре их образуются застойные зоны, а формирование соединения происходит неравномерно: схватываются края образцов, в то время как в центре свариваемых поверхностей схватывание слабое. Такое явление обусловлено тем, что в результате взаимной диффузии и образования химических связей резко увеличивается сила трения, в результате чего деформация локализуется на периферии образцов. Образование застойных зон и неравномерное схватывание снижают качество сварного соединения. Проведено моделирование процесса сварки. Установлено, что наиболее реальное состояние фрикционного взаимодействия в зоне контактов прослойки никеля с образцами титанового сплава и нержавеющей стали соответствует условию полного прилипания поверхностей (stick condition). Показано, что при плоских поверхностях соединяемых образцов в их центре образуются застойные зоны. С целью делокализации деформации вдоль свариваемых поверхностей предложено модифицировать поверхность никеля периодической системой мелких выступов. Методами моделирования определено влияние такого модифицирования на однородность деформации при сварке давлением. Показано, что при модифицировании поверхности никеля выступами в зоне контакта образуются небольшие полости. Формовка в течение $\tau=35$ минут при соотношении ширины к высоте выступа $S/h = 2/5$ на никелевой прослойке обеспечивает наиболее равномерное распределение деформации, а также полное устранение остаточных полостей на свариваемых поверхностях титановый сплав-никель и нержавеющая сталь-никель.

Ключевые слова: сварка давлением, сварка разнородных материалов, равномерность деформации, зона соединения

The effect of modification of nickel interlayer surface on the uniformity of deformation at pressure welding of titanium alloy and stainless steel

R. G. Khazgaliev¹, M.F. Imayev¹, R.R. Mulyukov^{1,2}, F.F. Safin³

¹Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 Khalturin St., Ufa, 450001, Russia

²Bashkir State University, 32 Z. Validi St., Ufa, 450076, Russia

³Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russia

Uniformity of deformation in connection zone during pressure welding of titanium alloy to stainless steel with nickel interlayer was studied. It was shown that stagnant zones in the center of the samples are formed if use metals with flat surfaces. For delocalization of deformation along welded surfaces the modification of nickel surface by creation of periodic system of small ledges was proposed. The effect of such modification on the uniformity of deformation at pressure welding was simulated. Uniformity of deformation in connection zone during pressure welding of titanium alloy to stainless steel with nickel interlayer was studied. Compound takes place unevenly, grasped the edge of the samples, while in the center of the welded surfaces weak grasp. This phenomenon is due to the fact that the friction force increases sharply as a result of interdiffusion and chemical bonding, resulting in localized deformation at the periphery of the samples. It was shown that stagnant zones in the center of the samples are formed if use metals with flat surfaces. Such compounds reduce the quality of the zone in the center of the samples. For delocalization of deformation along welded surfaces the modification of nickel surface by creation of periodic system of small

ledges was proposed. The effect of such modification on the uniformity of deformation at pressure welding was simulated. It was shown that the modification of the surfaces of connected materials protrusions are formed in the contact zone of the cavity.

Keywords: pressure welding, dissimilar metals joining, uniformity of deformation, welding zone

Введение

В различных конструкциях часто встречается сочетание деталей из титанового сплава и нержавеющей стали. В настоящее время такие детали соединяют, как правило, с помощью крепежных элементов. Крепежные элементы не только утяжеляют конструкцию, но и увеличивают ее момент инерции. Уменьшение последнего параметра особенно актуально для вращающихся частей двигателей и генераторов. Получение качественного неразъемного соединения этой пары позволит не только уменьшить вес и момент инерции, но и существенно усовершенствовать конструкцию ответственных узлов.

Попытки получения качественного соединения при непосредственном контакте образцов титанового сплава и нержавеющей стали не увенчались успехом, так как в этом случае образуются хрупкие интерметаллиды Fe — Cr — Ti и Fe — Ti, и возникают остаточные напряжений из-за несоответствия коэффициентов термического расширения соединяемых материалов. Одним из способов избежать образования хрупких интерметаллидов является использование тонких прослоек других металлов. Предложено много различных вариантов прослоек, включая многослойные [1—3]. Они позволяют существенно улучшить механические свойства соединений. В результате взаимной диффузии и образования химических связей между соединяемыми металлами значительно увеличивается коэффициент трения (вплоть до залипания). Между тем известно, что увеличение сил трения неизбежно приводит к неравномерности деформации и образованию застойных зон [4]. Вопросу однородности сварного соединения в литературе уделено недостаточного внимания.

Целью данной работы было исследовать равномерность соединения образцов титанового сплава и нержавеющей стали через никелевую прослойку, полученного сваркой давлением, а также показать возможность локализации деформации за счет изменения топографии поверхности прослойки.

Методика эксперимента

Размеры исходных образцов титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т составляли 4х4х16 мм³. Сварку давлением образцов стали и титанового сплава осуществляли через никелевую (НП2) прослойку толщиной 0,2 мм на установке «АЛА-ТОО (тип ИМАШ 20—78)». Режимы сварки: давление $P=4$ МПа, температура $T=650, 700$ и 750°C , время сварки $\tau=20$ мин, давление вакуума $P=2 \times 10^{-3}$ Па. Полученные образцы разрезали вдоль оси сжатия на электроэрозион-

ном станке и последовательно полировали алмазными пастами различной зернистости и коллоидной суспензией OP-S (Struers) с размером абразива 0,04 мкм. Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе Olympus GX51 и растровом электронном микроскопе Tescan Vega с приставкой для энергодисперсионного анализа Oxford Instruments X-act. Степень деформации никелевой прослойки рассчитывали по изменению ее высоты в трех участках: левом и правом краях прослойки и в центре.

Компьютерное моделирование процесса сварки проводили в двумерной постановке (плоская деформация) на базе универсального комплекса DEFORM. Инструмент задавался как абсолютно жесткое тело. Для моделирования использовали кривые упрочнения для сплавов Ti6Al4V и AISI 321 из базы данных Deform. Состав и механические свойства этих сплавов наиболее близки к ПТ3В и 12Х18Н10Т, соответственно. Набор кривых напряжение деформация для никеля НП2 был получен из работы [5].

Результаты и обсуждение

Эксперимент. На рис.1 представлены экспериментальные данные по степени деформации никелевой прослойки в зависимости от температуры и места на сварном шве. Степень деформации никелевой прослойки в целом уменьшается с увеличением температуры сварки. Данное обстоятельство связано как с резким увеличением размера зерен, так и увеличением сил трения на свариваемых поверхностях. Кроме того, при всех температурах сварки степень деформации в центре прослойки меньше, чем на краях (рис.1). Анализ структуры зоны твердофазного соединения показал, что в центре шва присутствуют участки с цепочками пор, в то время как на периферии шва таких участков не обнаружено. Полученные результаты согласуются с данными работы

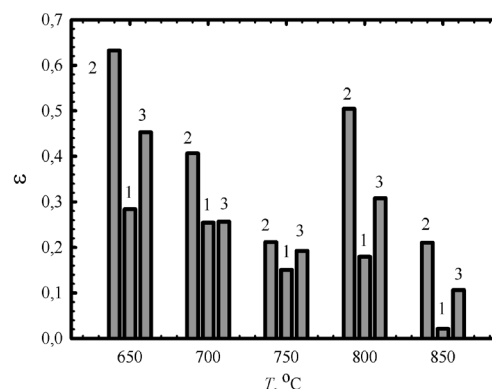


Рис. 1. Степень деформации в прослойке никеля: 1- центр; 2,3 – края.

Fig. 1. Strain in nickel interlayer after DB: 1 – center, 2, 3 – edges.

[6], где была обнаружена неравномерность деформации по ширине прослойки и различие в количестве пор в центральной зоне прослойки и по ее краям.

Количественный химический анализ показал, что интерметаллиды формируются при всех температурах сварки, причем с ростом температура ширина зон гетеродиффузии растет. Морфология интерметаллидов по разные стороны от никелевой прослойки разная. На границе титановый сплав — никель образуются сплошные слои трех интерметаллидных слоев Ti_2Ni , $TiNi$ и $TiNi_3$ с двухфазными областями между ними. Ширина зоны соединения титановый сплав — никель (без учета α -Ti области) изменяется от 7 до 20 мкм по мере увеличения температуры от $T=650^\circ C$ до $T=850^\circ C$. Зона соединения никель — сталь не имеет сплошной слоистой структуры. В ней обнаруживаются дисперсные частицы обогащенные хромом. Точный состав частиц определить не удалось, т.к. их размер меньше диаметра области генерации характеристического рентгеновского излучения. Ширина зоны соединения никель — сталь слабо зависит от температуры сварки и составляет 15—20 мкм. Более подробно об этом изложено в работах [6,7].

Таким образом, в процессе высокотемпературной выдержки образцов под давлением происходит формирование твердофазного соединения как в зоне контакта титановый сплав — никель, так в зоне сталь — никель. Формирование соединения сопровождается образованием интерметаллидов. Все эти процессы в совокупности приводят к возрастанию сил трения и неравномерности деформации вдоль никелевой прослойки. Центр прослойки деформируется слабее, и там образуется застойная зона. На периферии, благодаря более высокой степени деформации, сцепление происходит быстрее, и формируется более качественное соединение.

Очевидно, что для получения сплошного и качественного соединения необходимо равномерно распределить деформацию вдоль никелевой прослойки. Одним из путей решения этой проблемы может стать модификация поверхности соединяемых металлов посредством нанесения периодичной системы мелких выступов. В этом случае застойные зоны будут формироваться у вершин выступов. Нам представляется, что варьируя параметрами таких выступов можно существенно уменьшить площадь застойных зон и улучшить свариваемость материалов. Экспериментальное решение такого подхода весьма затратное. В данной работе для подтверждения возможности такого подхода выполнили численное моделирование процесса соединения образцов титанового

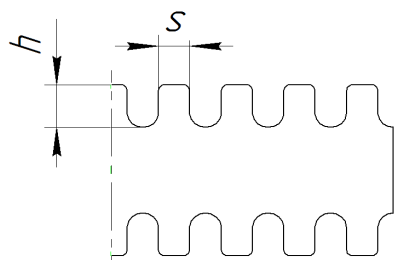


Рис. 2. Схема модифицирования поверхности никелевой прослойки.

Fig. 2. Scheme of surface modification of nickel layer.

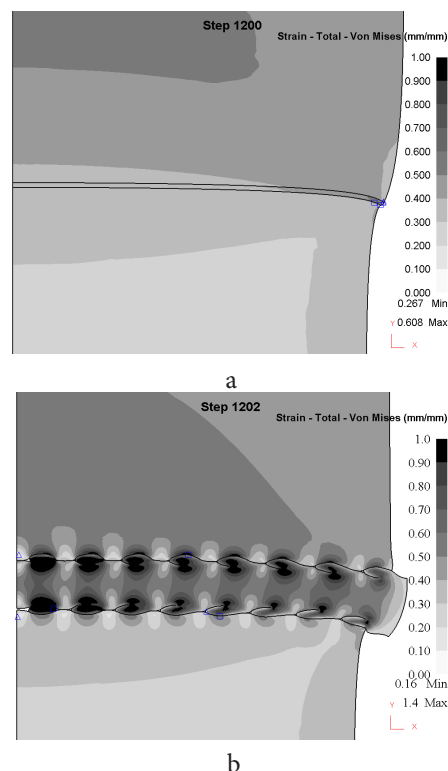


Рис. 3. Распределения деформации в зоне соединения при плоской (а) и модифицированной выступами (б) поверхности никелевой прослойки.

Fig. 3. Strain distribution in the bond region with flat (a) and modified by projections (b) surface of nickel layer.

сплава и стали через никелевую прослойку.

Моделирование. Для качественной проверки влияния выступов на однородность деформации при сварке, а также ускорения расчетов, была поставлена двумерная осесимметричная задача. Одинаковую периодическую систему выступов нанесли на обе стороны никелевой прослойки (рис.2). Выступы имеют плоскую вершину и закругленную кромку. Варьировали ширину S и высоту h выступов в условных единицах. Характеристикой качества соединения служила относительная протяженность оставшихся пор. Условия моделирования: $T=800^\circ C$, давление $P=4$ МПа, время процесса $t=20$ мин. Некоторые трудности возникли при выборе коэффициента трения. Сравнение с экспериментом показало, что наиболее точно результаты моделирования коррелируют с экспериментальными данными в случае задавания условий полного залипания (stick condition). Поэтому для моделирования процесса соединения прослойки никеля, как с образцом стали, так и с образцом титанового сплава, задавали условие полного залипания.

Сравнение картин распределения деформации при плоской и модифицированной поверхности прослойки никеля представлено на рис.3. Видно, что в случае плоской никелевой прослойки в центральной ее части образуется застойная зона, а деформация преимущественно локализована на краях прослойки. В случае модифицированной никелевой прослойки распределение деформации на поверхности более равномерное.

Нахождение оптимального соотношения S/h ослож-

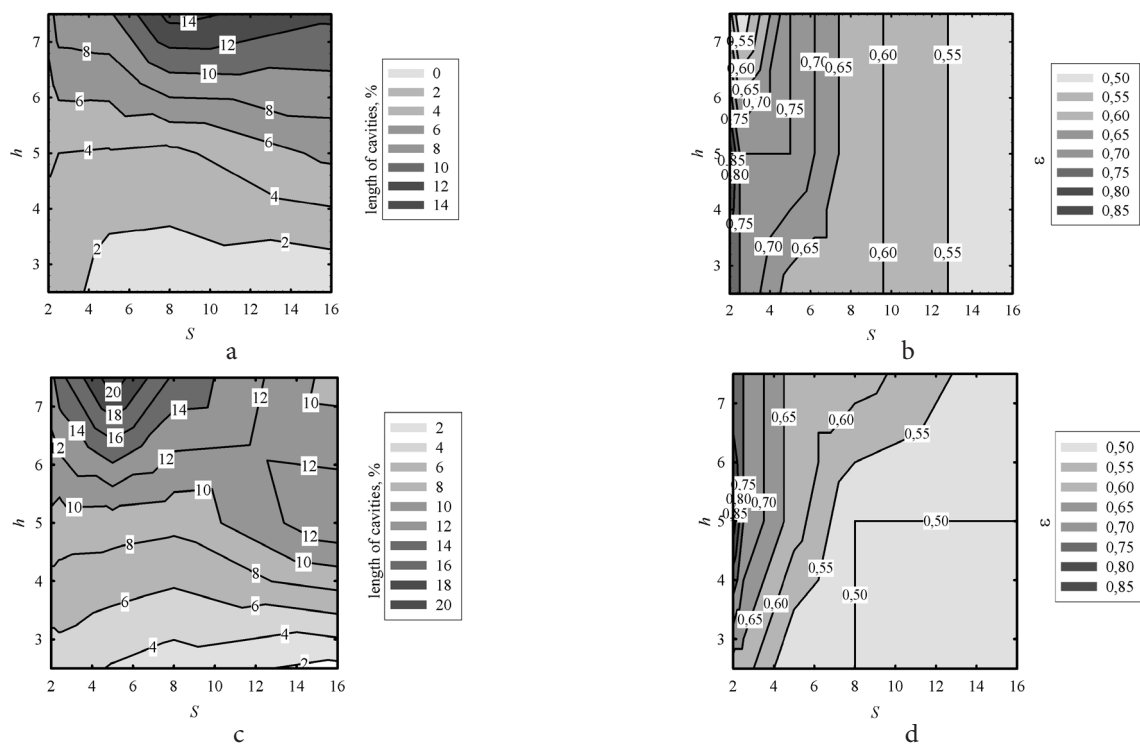


Рис. 4. Зависимости относительной протяженности полостей (a,c) и эквивалентной деформации (b,d) от высоты h и ширины S выступов на следующих поверхностях: (a,b) титановый сплав – никель; (c,d) нержавеющая сталь – никель.

Fig. 4. Dependence of relative length of the cavities (a,c) and equivalent strain (b,d) on the height h and width S of the projections on the following surfaces: (a,b) titanium alloy - nickel; (c,d) stainless steel - nickel.

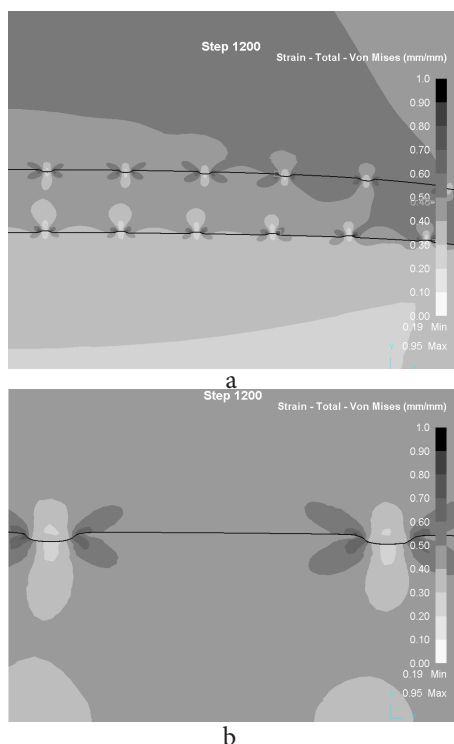


Рис. 5. Распределение эквивалентной деформации в соединении титановый сплав - никель - нержавеющая сталь при соотношении ширины и высоты выступов $S/h=16/2$; (a) общий вид, (b) увеличен второй слева выступ.

Fig. 5. Distribution of equivalent strain in the bond titanium alloy - nickel - stainless steel at width to height ratio of the projections $S/h = 16/2$; (a) general view, (b) increased second left projection.

няется необходимостью согласования двух независимых параметров, характеризующих процесс сварки: 1) протяженность остаточных полостей и 2) деформация в зоне соединения. Поскольку для осуществления соединения необходима деформация, то с точки зрения второго параметра оптимум — это область с максимальной эквивалентной деформацией. Однако область максимальной деформации не обязательно будет совпадать с областью минимальной протяженности полостей. Причем необходимо согласовать эти два параметра для обеих поверхностей: никель — титановый сплав и никель — нержавеющая сталь.

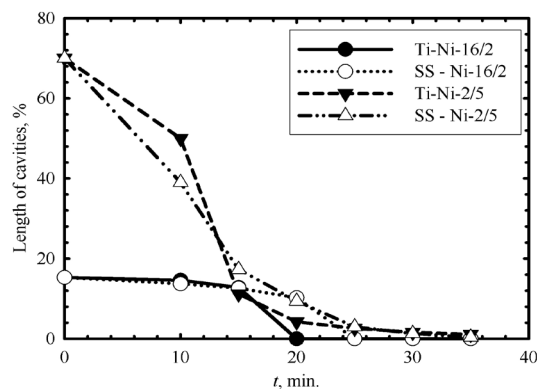


Рис. 6. Зависимость протяженности полостей от времени сварки для двух соотношений ширины к высоте выступа $S/h = 2/5$ и $16/2$.

Fig. 6. Dependence of length of cavities on welding time for two width to height ratios of the projections $S/h = 2/5$ and $16/2$.

Для поиска оптимального соотношения S/h построены диаграммы изменения протяженности полостей (рис.4а,с) и эквивалентных деформаций (рис.4б,д) для обеих свариваемых поверхностей. Видно, что изменение протяженности полостей и эквивалентной деформации для обеих поверхностей имеет приблизительно одинаковый вид. В парах титановый сплав — никель и сталь — никель минимумы протяженности полостей и максимумы деформации не совпадают: на обеих поверхностях минимумы протяженности полостей находятся в области больших S и малых h (правый нижний угол диаграмм), в то время как максимумы деформации реализуется при $S/h = 2/5$.

Очевидно, что область низких и широких выступов нельзя рассматриваться как оптимальную, т.к. при таких низких уровнях деформации соединения металлов не произойдет. Это хорошо видно из распределения эквивалентной деформации в случае широких и невысоких выступов на никелевой прослойке (рис.5). У широкого выступа образуется застойная зона, что фактически означает возврат к случаю сплошной плоской поверхности с локализацией деформации у краев образца (рис.3).

Таким образом, оптимумом следует считать соотношение $S/h = 2/5$, при котором достигается максимум деформации, хотя в этом случае протяженности полостей на поверхностях титан-никель и сталь-никель составляют соответственно 5 и 9 у.е. Для уменьшения протяженности полостей разумнее увеличить время выдержки под давлением. На рис.6 представлена зависимость протяженности полостей для двух соотношений $S/h = 2/5$ и $16/2$. Видно, что исчезновение полостей на обоих типах выступов происходит за 35 минут. Но, если в случае $S/h = 2/5$ величина эквивалентной деформации равна $e = 1,35$, то для $S/h = 16/2$ она меньше единицы. Таким образом, даже увеличение времени формовки не приводит к повышению степени деформации в случае $S/h = 16/2$. Поэтому оптимальными условиями сварки следует считать: $S/h = 2/5$, время выдержки — $\tau = 35$ мин.

Выводы

Образование соединения образцов титанового сплава и нержавеющей стали через никелевую прослойку при формовке происходит крайне неравномерно: схватываются края образцов, в то время как в центре свариваемых поверхностей схватывание слабое. Такое явление обусловлено тем, что в результате взаимной диффузии и образования химических связей резко увеличивается сила трения, в результате чего деформация локализуется на периферии образцов.

Проведено моделирование процесса сварки. Установлено, что наиболее реальное состояние фрикционного взаимодействия в зоне контактов прослойки никеля с образцами титанового сплава и нержавеющей стали соответствует условию полного прилипания поверхностей (stick condition). Показано, что при плоских поверхностях соединяемых образцов в их центре образуются застойные зоны.

Как показало моделирование, модифицирование обо-

их поверхностей никелевой прослойки периодической системой мелких выступов способствует более равномерному распределению деформации в зоне контакта разнородных материалов. Формовка в течение $\tau = 35$ минут при соотношении ширины к высоте выступа $S/h = 2/5$ на никелевой прослойке обеспечивает наиболее равномерное распределение деформации, а также полное удаление остаточных полостей на свариваемых поверхностях титановый сплав-никель и нержавеющая сталь-никель.

Литература / References

1. V.R. Ryabov, D.M. Rabkin, R.S. Kurochka, L.G. Strizhevskaya. Welding of dissimilar metals and alloys. M. Mashin. (1984) 239 p. (in Russian) [В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочка, Л.Г. Стрижевская. Сварка разнородных металлов и сплавов. М. Машиностроение. (1984) 239 с.]
2. A. V.Lyushinskiy. Diffusion welding of dissimilar materials: a manual for students in higher education. Academy. (2006) 239 p. (in Russian) [А.В. Люшинский. Диффузионная сварка разнородных материалов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Академия. (2006) 208 с.]
3. E. S. Karakozov. Welding of metals pressure. M. Mashin. (1986) 280 p. (in Russian) [Э.С. Каракозов. Сварка металлов давлением. М. Машиностроение. (1986) 280 с.]
4. M. V. Storozhev, E.A. Popov. Theory of plastic metal working. M. Mashin. (1977) 423 p. (in Russian) [М.В. Сторожев, Е.А. Попов. Теория обработки металлов давлением. М. Машиностроение. (1977) 423 с.]
5. O. A. Kaybyshev, A.A. Markelov. Izvestia - Ferrous Metallurgy. 7, 119—121 (1973). (in Russian) [О.А. Кайбышев, А.А. Маркелов. Известия ВУЗов. Черная металлургия. 7, 119—121 (1973).]
6. E. V. Valitova, A. Kh. Akhunova, V.A. Valitov, S.V. Dmitriev, R. Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrakhimov. Letters on Materials. 4 (3), 190—194 (2014). (in Russian) [Э.В. Валитова, А.Х. Ахунова, В.А. Валитов, С.В. Дмитриев, Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов. Письма о материалах. 4 (3), 190—194 (2014).]
7. R. G. Khazgaliev, M. Kh. Mukhametrakhimov, R.R. Mulyukov, R. Ya. Lutfullin Journal Perspektivnye materialy. 529—534 (2011). (in Russian) [Р.Г. Хазгалиев, М.Х. Мухаметрахимов, Р.Р. Мулюков, Р.Я. Лутфуллин. Перспективные материалы. 529—534 (2011).]
8. R. G. Khazgaliev, A.R. Khalikov, S.V. Dmitriev. In: Collection of works of Russian scientific and practical conference of young scientists and students, ed by S.B. Sapozhkov, E.V. Politsinskiy, E.G. Soboleva, T.S. Katruk, E.G. Fisochenko. Yurga Institute of Technology. Tomsk. (2014) 167—172 p. (in Russian) [Р.Г. Хазгалиев, А.Р. Халиков, С.В. Дмитриев. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Юргинский технологический институт. Под ред. С.Б. Сапожков. Томск. Издательство Томского политехнического университета (2014) 167—172 с.]