

Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций Часть II. Опыт ИПСМ РАН

Сафиуллин Р.В.

dr_rvs@mail.ru

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

Superplastic forming and pressure welding of multilayer hollow structures Part II. Experience of IMSP RAS

R.V. Safiullin

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

Предлагается вторая часть обзора, где описаны результаты многолетних исследований по разработке технологии сверхпластической формовки и сварки давлением (СПФ/СД), проведенных в Институте проблем сверхпластичности металлов РАН (ИПСМ РАН). В первой части был представлен международный опыт развития данной технологии.

Ключевые слова: сверхпластическая формовка, сварка давлением, полые конструкции, титановый сплав.

In the Part II of the review we describe the results of long-term investigations conducted at the Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS (IMSP RAS) related to the development of the technology of superplastic forming and pressure welding (SPF/PW). In the Part I the international experience has been described.

Keywords: superplastic forming, pressure welding, hollow structures, titanium alloy.

1. Введение

Успех развития технологии получения многослойных тонколистовых конструкций совмещением сверхпластической формовки со сваркой давлением во многом зависит от глубины понимания природы сверхпластичности, природы формирования твердофазного соединения, кинетики формообразования рассматриваемых конструкций и взаимосвязи между этими явлениями. Это, в свою очередь, приводит к необходимости проведения систематических исследований сверхпластичных материалов, изучению их механических и технологических свойств и поведения в условиях сверхпластической деформации.

В этой связи, в ИПСМ РАН на протяжении более чем 20 лет проводятся фундаментальные научные исследования сварки в твердой фазе сверхпластичных материалов. Разработан целый ряд методик исследований. Они позволяют изучать кинетику и механизм процесса образования соединения в твердом состоянии в условиях сверхпластичности, исследовать формообразование многослойных конструкций, определять режимы формовки и сварки, исследовать механические и эксплуа-

тационные свойства получаемых конструкций, а также разрабатывать технологические рекомендации по изготовлению конкретных изделий [1,2]. Проведенные исследования позволили впервые выделить ведущую роль сверхпластической (СП) деформации в образовании твердофазного соединения и выявить механизм его формирования [3-5]. Полученные научные результаты имеют значительную новизну, так как кардинально изменяют общепринятые представления на природу соединения в твердой фазе и дают возможность разрабатывать перспективные технологии.

В последующих разделах опишем основные результаты, полученные в ИПСМ РАН и направленные на развитие технологии СПФ/СД.

2. Микрорельеф после СПФ и образование твердофазного соединения

На основании анализа литературных данных и экспериментальных данных полученных в ИПСМ, предложены: а) схема формирования поверхностного микрорельефа, приведенная на рис. 1 [3] и схема формирования твер-

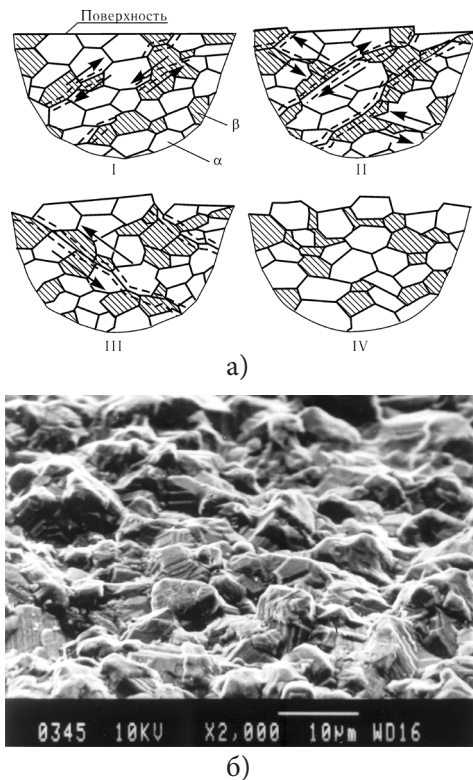


Рис. 1. (а) Схема формирования поверхностного микрорельефа при СПФ. (б) Микрорельеф поверхности листового титанового сплава ВТ6 после СПФ.

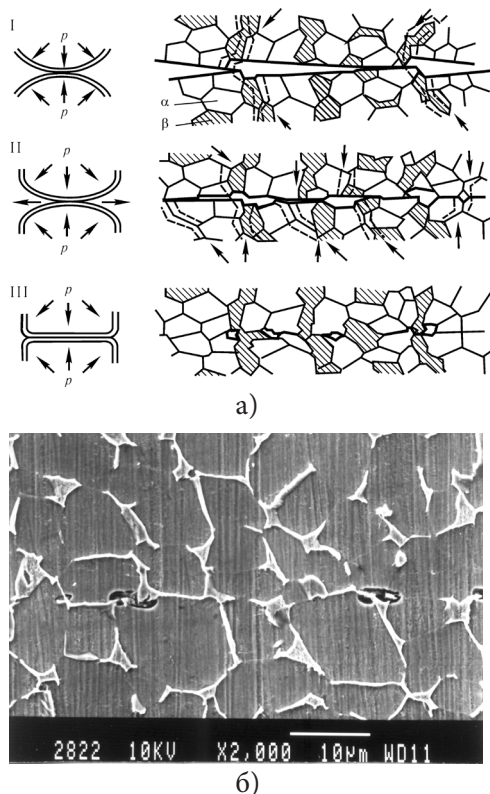


Рис. 2. (а) Схема формирования соединения в твердом состоянии в условиях сверхпластической формовки. (б) Оптическое изображение области соединения двух листов.

дофазного соединения при сверхпластической формовке, показанная на рис. 2.

На 1 этапе формируются точечные контакты на соединяемых поверхностях, по вершинам деформацион-

ного рельефа. Причем точечные контакты возникают по выступающим участкам α -фазы. Это определяет типичное расстояние между точками схватывания и особенность последующей деформации листов. Необычно быстрое схватывание на этих участках свидетельствует о высокой активирующей способности кооперированного зернограницного проскальзывания (ЗГП).

На этапе 2, когда площадь контакта увеличивается за счет прохождения дальнейшей деформации, центральные участки, в которых первоначально возникают точечные контакты, подвергаются растягивающим деформациям. Благодаря проходящим процессам ЗГП деформация локализуется в участках, не находящихся в контакте. В результате, эти участки сближаются, входят в контакт и уменьшаются. Увеличивается площадь контактирования, однако соединение еще не полностью образовано, так как сохраняется поверхность раздела.

На этапе 3 завершается совместная деформация соединяемых листов, исчезает поверхность раздела. Это происходит благодаря одновременному действию нескольких процессов: совместному ЗГП контактирующих зерен, заполнению пор β - фазой и развитию диффузионных процессов.

Результаты экспериментальных исследований механизма формирования соединения в твердом состоянии и формообразования многослойных ячеистых конструкций послужили научной основой для разработки интегральных технологий. Для успешного освоения технологии СПФ/СД был разработан типовой процесс изготовления многослойных ячеистых конструкций из листовых титановых сплавов. Он включает следующие основные этапы: 1) изготовление сварных полуфабрикатов; 2) контроль герметичности сварных полуфабрикатов; 3) сборку штамповой оснастки; 4) сверхпластическую формовку и сварку давлением; 5) контроль качества.

3. Примеры изготовления конструкций по технологии СПФ/СД

В ИПСМ на основе типового технологического процесса разработаны опытные технологические процессы получения методом СПФ/СД различного вида пустотелых интегральных конструкций сложной конфигурации и повышенной жесткости. С использованием данной технологии из промышленных титановых сплавов изготовлены опытные образцы новых типов сварных пустотелых конструкций - плоские, цилиндрические и криволинейные ячеистые панели. Особенностью полученных деталей (рис. 3) является то, что они практически охватывают все возможные схемы и варианты изделий, которые возможно получить по технологии СПФ/СД. Результаты механических испытаний и металлографических исследований узлов свидетельствуют о высоком качестве изготовленных изделий. Для осуществления процесса СПФ/СД создан комплекс специализированного оборудования на базе промышленной электронагревательной печи, включающий штамповые блоки, автоматизированную систему управления про-

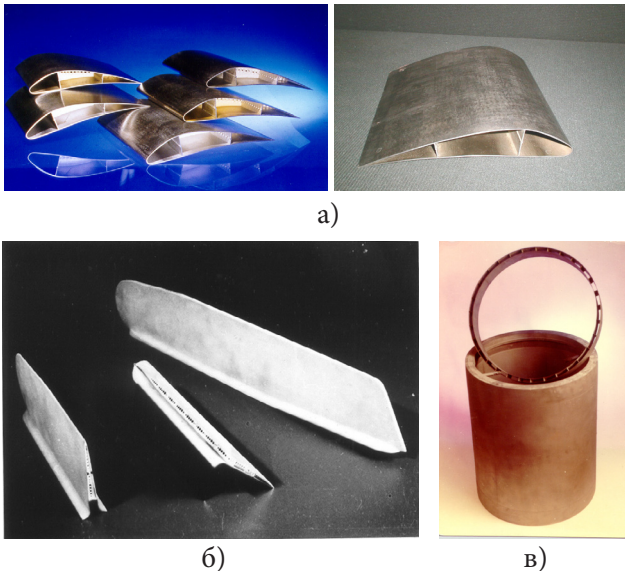


Рис. 3. Изделия, полученные по технологии СПФ/СД в ИПСМ РАН: (а) панель, (б) крыло, (в) цилиндрический корпус.

цессом СПФ/СД, контейнер для защиты рабочей изделий от окисления.

В ИПСМ РАН проводятся комплексные работы, включающие фундаментальные научные исследования, конструкторские и технологические разработки. Получено более 20 авторских свидетельств и патентов, в ведущих российских и зарубежных изданиях опубликовано более 30 статей. Разработка технологий проводилась в тесном сотрудничестве с Российским Федеральным Ядерным Центром Всероссийским Научно-исследовательским Институтом Технической Физики (РФЯЦ-ВНИИТФ). В частности в РФЯЦ-ВНИИТФ создано уникальное оборудование, разработаны методики испытаний и проведены испытания образцов многослойных ячеистых конструкций на усталость, сжатие, кручение и баллистический удар. Кроме того, были разработаны методики и создано оборудование для проведения неразрушающего контроля изделий полученных по технологии СПФ/СД лазерно-голографическими методами. Результаты совместных работ обобщены и изданы в совместной монографии – «Ячеистые конструкции» (Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008. – 176 с.)

Основное направление работ последних лет связано с исследованиями нового класса материалов – экспериментальных листовых наноструктурных сплавов. Проведенные исследования позволили установить, что наноструктурные листовые заготовки обладают хорошей формуетостью и свариваемостью и могут использоваться для производства разного рода сложнопрофильных пустотелых изделий, получаемых по технологии СПФ/СД. Использование наноструктурных заготовок позволяет снизить температуру сверхпластической формовки (СПФ) на 250...300°C, а температуру сварки в твердой фазе на 100...200°C. Проведенные исследования позволили впервые реализовать эффект низкотемпературной сверхпластичности на практике при изготовлении модели полый лопатки по технологии СПФ/СД (рис. 4).

Другим примером перспективного использования технологии СПФ/СД является разработанная в ИПСМ конструкция лицевой пластины головки клюшки для

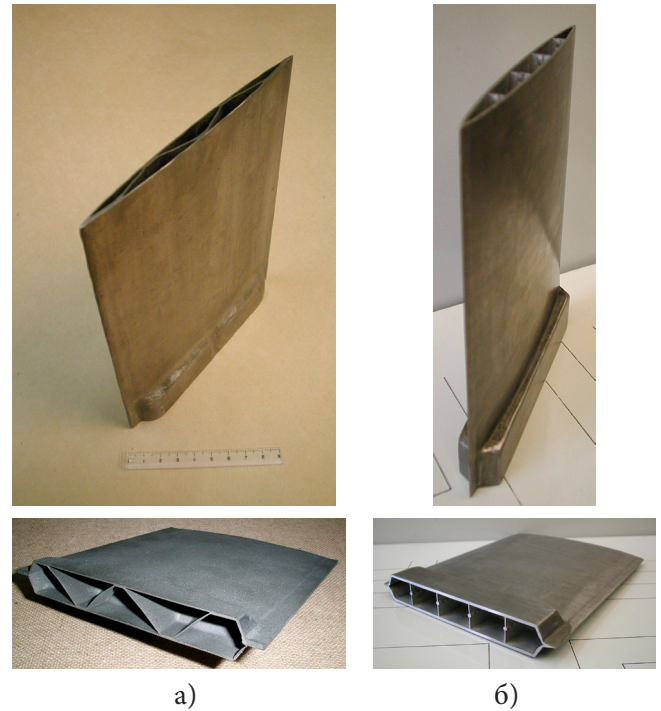


Рис. 4. Модели полый лопатки, изготовленной из экспериментального наноструктурного листового титанового сплава ВТ6 при: а) $T=750^{\circ}\text{C}$, б) $T=800^{\circ}\text{C}$.

игры в гольф и способ ее изготовления [6] (рис. 5). Опытные образцы лицевых пластин из титановых сплавов ВТ6 и ВТ23 были переданы заказчику для испытаний. Получены положительные результаты полевых (на игровых полях России, США и Республики Корея) и стендовых испытаний (фирма Nike, USA) лицевых пластин. Особенностью изготовленных лицевых пластин является использование титанового сплава в наноструктурном состоянии.

В настоящее время ИПСМ РАН совместно с ОАО «Авиадвигатель», ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и ОАО «УМПО» разрабатывается конструкция и технология изготовления облегченной ширококордной лопатки вентилятора авиадвигателя из титанового сплава ВТ6 [7]. Отработка технологии изготовления полых лопаток проводится на лопатках-имитаторах. Разработана конструкция лопатки-имитатора, изготовлена технологическая оснастка и автоматизированный комплекс управления параметрами процесса СПФ/СД (рис. 6), которые были успешно апробованы в ОАО «Авиадвигатель». Изготовлена опытная партия лопаток-имитаторов. Полученные лопатки-имитаторы и плоские образцы



Рис. 5. Лицевые пластины головки клюшки для гольфа.

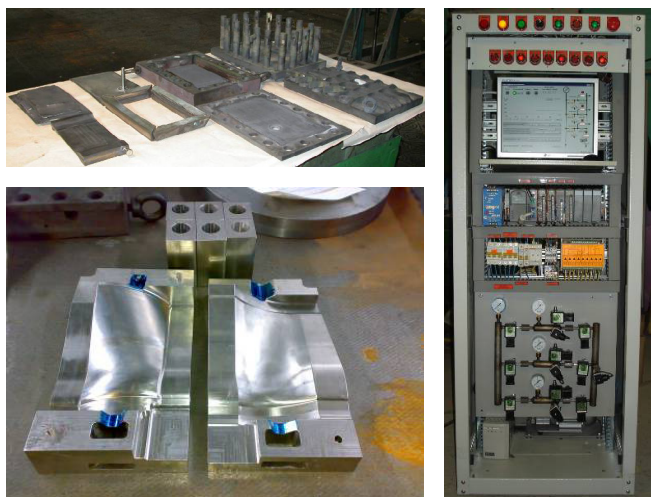


Рис. 6. Технологическая оснастка и автоматизированный комплекс управления параметрами процесса СПФ/СД.



Рис. 7. Лопатки-имитаторы и плоский образец полый лопатки на выставке в Авиасалоне МАКС-2009, г. Жуковский.

лопаток демонстрировались на выставке в Авиасалоне МАКС-2009, г. Жуковский (рис. 7).

Проводятся исследования микроструктуры и механических свойств полученных лопаток, разрабатываются методики неразрушающего контроля на основе цифровой голографической интерферометрии, акустической эмиссии, рентгеновской томографии, акустической микроскопии.

При разработке технологии СПФ/СД в ИПСМ РАН активно применяются методы компьютерного моделирования, позволяющие оценить саму возможность получения желаемой формы конструкции и оптимизировать параметры процесса СПФ/СД с целью повышения качества готовых изделий [8-13].

Благодаря многолетнему опыту исследований и технологических разработок, а также наличию подготовленных квалифицированных кадров, ИПСМ РАН, в тесной кооперации с заинтересованными предприятиями, обладает большим потенциалом для успешного развития производства многослойных полых конструкций для нужд авиакосмического комплекса России. Перспективы развития технологии СПФ/СД непосредственно связаны с использованием наноматериалов.

4. Заключение

1. Многолетние исследования, проводимые в ИПСМ РАН в области СПФ/СД, дали возможность создать целую серию оригинальных методик исследования, которые позволили впервые выявить ведущую роль сверхпластической деформации в образовании твердофазного соединения и выявить механизм его формирования.

2. На основании проведенных исследований разработаны технологические рекомендации и опытные технологические процессы изготовления типовых изделий авиакосмической техники методом СПФ/СД.

3. Впервые в технологии СПФ/СД реализована идея низкотемпературной сверхпластичности при изготовлении модели полый лопатки с ячеистым наполнителем.

Литература

1. R.V. Safullin, F.U. Enikeev Determination of thinning characteristics during superplastic sheet forming processes. Proceedings of the International Conference Superplasticity and Superplastic Forming, Edited by A.K. Ghosh and T.R. Bieler, 1995, p.213-217.
2. R.V. Safullin, F.U. Enikeev, R.Y. Lutfullin Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo 4, 8 (1994) (in Russian) [Р.В. Сафиуллин, Ф.У. Еникеев, Р.Я. Лутфуллин. Кузнечно-штамповочное производство 4, 8 (1994)].
3. O.A. Kaibyshev, R.V. Safullin, R.Y. Lutfullin, V.V. Astanin. Journal of Materials Engineering and Performance 8(2), 205 (1999).
4. R.Y. Lutfullin. Letters on Materials 1(1), 59 (2011) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. Письма о материалах 1(1), 59 (2011)].
5. R.Y. Lutfullin. Letters on Materials 1(2), 88 (2011) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. Письма о материалах 1(2), 88 (2011)].
6. Patent RF № 2233683. O.A. Kaibyshev, A.A. Kruglov, R.V. Safullin, R.Y. Lutfullin, V.V. Astanin.
7. R.V. Safullin, A.A. Kruglov, O.A. Rudenko, S.A. Kharin, A.N. Sairanov, M.A. Morozov, V.B. Timokhov, V.A. Kropotov Titan 4(26), 34 (2009) (in Russian) [Р.В. Сафиуллин А.А. Круглов, О.А. Руденко, С.А. Харин, А.Н. Сайранов, М.А. Морозов, В.Б. Тимохов, В.А. Кротов. Титан 4(26), 34 (2009).]
8. O.A. Kaibyshev, A.A. Kruglov, A.R. Tayupov, V.K. Berdin, R.Y. Lutfullin. Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo 9, 20 (1990) (in Russian) [О.А. Кайбышев, А.А. Круглов, А.Р. Таюпов, В.К. Бердин, Р.Я. Лутфуллин. Кузнечно-штамповочное производство 9, 20 (1990)].
9. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev, A.A. Kruglov, A.R. R.V. Safullin Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo 6, 15 (2009) (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. Кузнечно-штамповочное производство 6, 15 (2009).]
10. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev Deformatsiya i Razrushenie Materialov 11, 40 (2009) (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев. Деформация и разрушение материалов 11, 40 (2009).]
11. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev, A.A. Kruglov, R.V. Safullin. Key Engineering Materials 433, 319 (2010).
12. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev Deformatsiya i Razrushenie Materialov 9, 38 (2010) (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. Деформация и разрушение материалов 9, 38 (2010).]
13. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev, A. A. Kruglov, R.V. Safullin Perspektivnye Materialy 12, 42 (2011) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. Перспективные материалы 12, 42 (2011)].