

Сварка давлением объемных образцов из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V в состоянии низкотемпературной сверхпластичности

Мухаметрахимов М.Х.

msia@mail.ru

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

Pressure welding of nanostructured Ti-6Al-4V titanium alloy bulk samples in the state of low temperature superplasticity

M.Kh. Mukhametrakhimov

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

Рассматривается вопрос снижения до 600°C температуры осуществления сварки давлением по схеме осадки образцов из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V с целью получения качественного сварного соединения. Поставленная задача решена за счет использования эффекта низкотемпературной сверхпластичности, характерной для сплавов со средним размером зерен не более 0,3 мкм, в условиях, когда ведущую роль в формировании твердофазного соединения играют деформационные процессы. Придание цилиндрической заготовке специальной конфигурации – выделение локальной зоны сварки с меньшей площадью поперечного сечения позволяет обеспечить устойчивую локализацию пластического течения именно в этой зоне и течение материала в энергетически наиболее выгодных условиях, т.е. является средством, оптимизирующим затраты энергии на деформацию. Приведены результаты конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния образцов различной конфигурации.

Ключевые слова: моделирование, низкотемпературная сверхпластичность, наноструктура, твердофазное соединение, локализация деформации, титановый сплав

The paper considers the possibility to decrease the pressure welding temperature of nanostructured Ti-6Al-4V titanium alloy down to 600°C to process sound welded joints. The aim is attained by using the effect of low temperature superplasticity demonstrated by the alloy with a mean grain size not greater than 0.3 μm under conditions when deformation processes play a major role in the formation of solid state joint. The special shaping of the sample to achieve a zone with a smaller cross section area allows to achieve a steady localization of plastic flow directly in the zone of joining and promotes a flow of a material under condition most favorable in terms of deformation energy (load, force), thus it optimizes consumption of the energy needed for deformation. The results of finite element analysis of the stress-strain state of various shape samples are presented.

Keywords: simulation, low temperature superplasticity, nanostructure, solid phase joining, localization of deformation, titanium alloy

Сварка давлением (СД) относится к перспективным ресурсосберегающим технологическим направлениям машиностроения, и ее эффективность может быть существенно повышена при использовании явления структурной сверхпластичности (СП). В экспериментальных работах авторов [1, 2], было установлено, что ускоренное формирование твердофазного соединения (ТФС) в состоянии СП с достижением уровня свойств основного материала базируется преимущественно на термомеханических процессах и обеспечивается при условии максимальной реализации в процессе СД

основного механизма СП деформации - зернограницного проскальзывания (ЗГП).

На современном этапе развития технологий горячего формообразования титановых сплавов весьма актуальным является вопрос снижения температуры осуществления технологического цикла. В частности, известно, что температура 760°C, по мнению зарубежных специалистов [3] могла бы рассматриваться как оптимизированная температура для серийной технологии изготовления изделий сложной конфигурации авиационного назначения путем сверхпластической формовки (СПФ)

и СД из листовых заготовок титанового сплава Ti-6Al-4V, являющегося аналогом российского сплава ВТ6.

Известно [4], что снижение температуры СП деформации на 250-300°C возможно для титановых сплавов со средним размером зерен не более 0,5 мкм. Полученные в исследовательских работах [1, 2, 5, 6] экспериментальные результаты свидетельствуют о ведущей роли термомеханических процессов в формировании ТФС. Это обстоятельство определяет насущную необходимость при разработке конкретных технологий СД детального изучения напряженно-деформированного состояния в зоне формирования сварного соединения [7].

Как показали предварительные структурные исследования, для сохранения наноструктурного (НС) состояния в сплаве Ti-6Al-4V его температура обработки не должна превышать 650°C [8].

Для титанового сплава Ti-6Al-4V перевод в НС состояние увеличивает суммарную протяженность границ зерен в сплаве. Это определяет повышенную роль механизма ЗГП в деформации и приводит к улучшению его свариваемости и повышению качества сварного соединения. Заметим, что натурные эксперименты [9, 10] показывают, что для титановых образцов с НС структурой повышение температуры сварки до 700°C приводит к снижению до 5% требуемой деформации, необходимой для достижения качественного соединения. Малая степень деформации необходима для формирования сварного соединения, очевидно, указывает на возрастающую с повышением температуры роль диффузии между контактирующими поверхностями. Однако отрицательным фактором повышенной диффузии является ускоренный рост зерен, приводящий к выходу из НС состояния и, как следствие, - потере уникального комплекса физико-механических свойств обрабатываемого сплава.

Существенное сокращение сроков разработки и отладки технологии может быть достигнута за счет применения методов компьютерного и физического моделирования, позволяющих проанализировать все аспекты процесса образования ТФС.

Для моделирования процесса сварки давлением объемных образцов из НС титанового сплава Ti-6Al-4V была использована университетская версия программы ANSYS 5.7.

Рассматривалась задача деформирования упругопластического тела в статической постановке. Для описания его механических свойств выбран элемент PLANE182, наделенный упруго-пластическими свойствами. При этом учитывалась симметрия заготовки вдоль оси OX и задавалась кусочно-линейная зависимость $\sigma \sim \epsilon$, соответствующая свойствам титанового сплава Ti-6Al-4V с НС структурой со средним размером зерен 0,3 мкм для заданной скорости деформирования $\dot{\epsilon} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ [9]. Разупрочнением материала пренебрегали в силу его незначительной величины в условиях СП деформации. При задании краевых условий учитывалось, что свариваемые образцы подвергаются деформации в одинаковых условиях, а сварка приводит к «прилипанию» их контактирующих поверхностей. Другими словами, соблюдалась симметрия также и вдоль оси OY и, соответственно, неподвижность контактирующей поверхности вдоль оси OX. Внешнее воздействие на образец моделировалось

заданием перемещения задней торцевой поверхности, что соответствовало заданию и контролю программы деформирования у задействованной в натурном эксперименте машины нагружения.

СД осуществляли осадкой установленных один на другой образцов габаритным размером 5x5x18 мм³. Часть осаживаемого образца, смежная к зоне сварки имела цилиндрическую форму, тогда как остальная часть имела форму призмы с квадратным основанием. В зоне сварки образцы контактировали по площади круга с уменьшенной площадью поперечного сечения (высота базовой цилиндрической части составляла 2 мм), а противоположная часть образца, к которой прикладывалось сварочное усилие имела квадратное поперечное сечение. Соединение объемных образцов исследуемого сплава проводили, используя усовершенствованную вакуумную установку на базе ИМАШ 20-78, обеспечивающую принудительное сжатие свариваемых образцов в температурно-скоростном режиме проявления низкотемпературной СП, степень деформации при этом была в пределах до 50% в локализованной зоне сварки.

Качество ТФС оценивали как металлографически, так и по результатам механических испытаний на растяжение. Поверхность соединения ориентировали в центральной части испытываемого образца перпендикулярно оси растяжения.

Придание свариваемому образцу специальной конфигурации – выделение зоны соединения формы цилиндра с меньшей площадью поперечного сечения (рис. 1) позволяет обеспечить устойчивую локализацию пластического течения именно в этой зоне и в температурно-скоростных условиях деформирования, при которых проявляется СП. Таким образом реализуется течение материала в энергетически наиболее выгодных условиях, путем оптимизации затрат энергии на деформацию. При этом основная деформация локализуется в зоне соединения, в то время как большая часть образца деформируется слабо [11].

У образцов с переменной площадью поперечного сечения (рис. 1) локализация деформации при осадке в зоне соединения появляется сразу, в отличие от образцов с постоянной площадью поперечного сечения (рис. 2), и локально деформированный объем определяется геометрическими характеристиками образца [11].

Как видим, для образца переменного сечения с меньшим радиусом (рис. 1) значение нормального сжимающего напряжения вдоль оси деформирования (компонент σ_{xx} тензора напряжения) в этой зоне достигает – 1590 МПа, в то время, как в остальной ее части изменяется в интервале от – 1170 МПа до – 324 МПа. А при деформировании образца постоянного сечения (рис. 2) непосредственно в области, прилегающей к границе контакта, нормальные напряжения не превосходят – 1210 МПа и на большей части образца эта величина распределена более равномерно до – 1120 МПа. Именно, поэтому при значительно большей энергии деформации образцов (466 Дж по сравнению с 375 Дж для образца переменного сечения) не происходит их соединения.

Как показывают расчеты, у образцов с локализованной зоной деформации нормальные напряжения снижаются от центра очага деформации к краю от – 1590 МПа

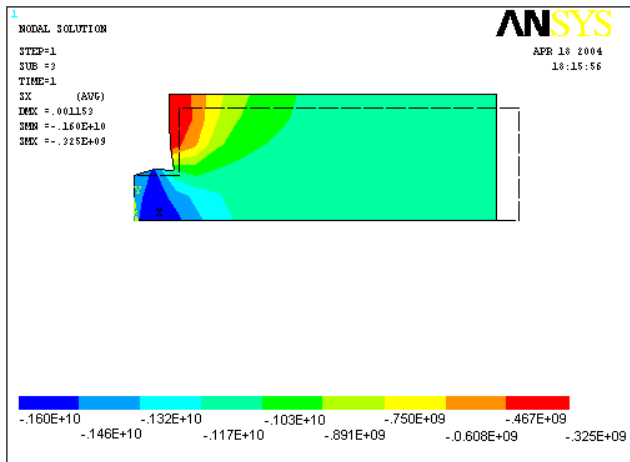


Рис. 1. Нормальные напряжения в образце с выделенной приконтактной зоной

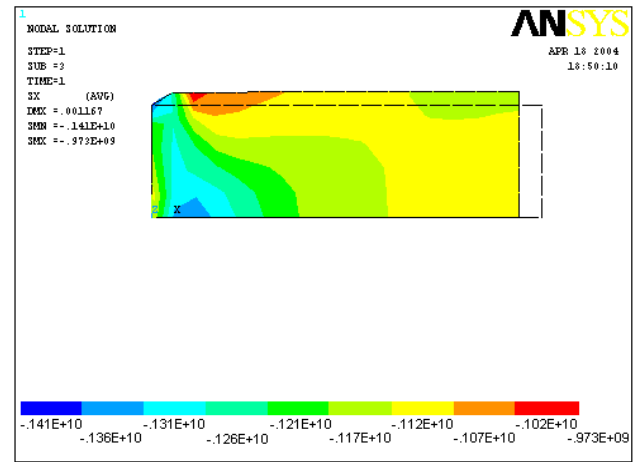


Рис. 2. Нормальные напряжения в образце с постоянной площадью поперечного сечения

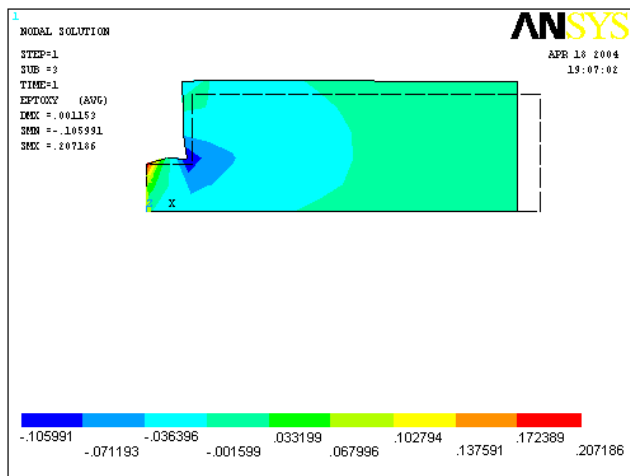


Рис. 3. Сдвиговые деформации в образце с выделенной приконтактной зоной

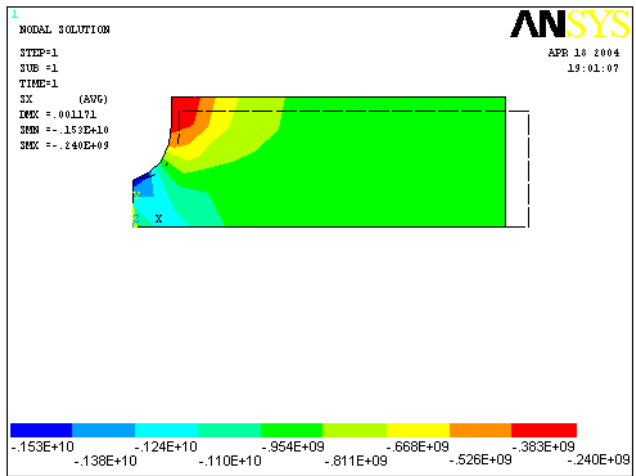


Рис. 4. Нормальные напряжения в образце с плавным уменьшением площади поперечного сечения

до – 1170 МПа. Это согласуется с результатами исследования экспериментальных образцов, согласно которым на контуре поверхности контакта сварное соединение ослабевает и там локализуется внешнее кольцо концентрации напряжения. Кроме того, вследствие бочкообразного (рис. 1) формоизменения выделенной локализованной зоны, на ее границе с основной частью образца также образуется концентратор напряжения. Сдвиговые напряжения в этой области σ_{xy} (τ_{xy}) резко отличаются от значений в остальных частях деформируемого тела и достигают наименьшего (наибольшего по абсолютной величине) значения – 2440 МПа, а сдвиговые деформации ϵ_{xy} соответственно – 0,106 (рис. 3), что приводит к возникновению там трещин.

Но, как известно [12], локализация пластической деформации при сжатии обуславливается геометрической формой деформируемого тела. Таким образом, изменяя начальную конфигурацию образца, мы имеем возможность влиять на степень локализацию деформации и обеспечить более выгодные условия деформирования в зоне сварки.

Рассмотрим в этой связи образец четвертого типа, с плавным уменьшением площади поперечного сечения от основы к поверхности сварки. На рис. 4 приведен такой образец с радиусом кривизны переходной зоны 2 мм. Как показывают расчеты, распределение абсо-

лютной величины нормальных напряжений σ_{xx} при его сжатии на ту же величину не падает, а растет от – 1100 МПа в центре (линии осевой симметрии) до – 1530 МПа у поверхности выделенной приконтактной области, что должно обеспечивать его лучшую свариваемость. При этом энергия деформации образца такой формы составляет всего 352 Дж, что еще меньше, чем для предыдущего варианта. Кроме того, очевидно, образец такой формы устойчивее по отношению к поперечным нагрузкам.

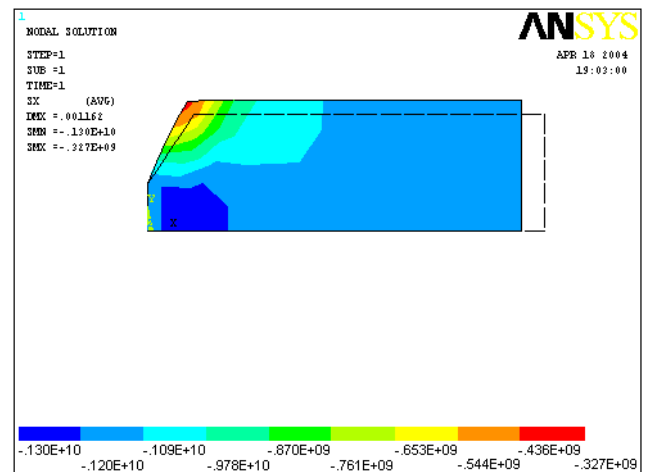


Рис. 5. Нормальные напряжения в образце с линейным уменьшением площади поперечного сечения

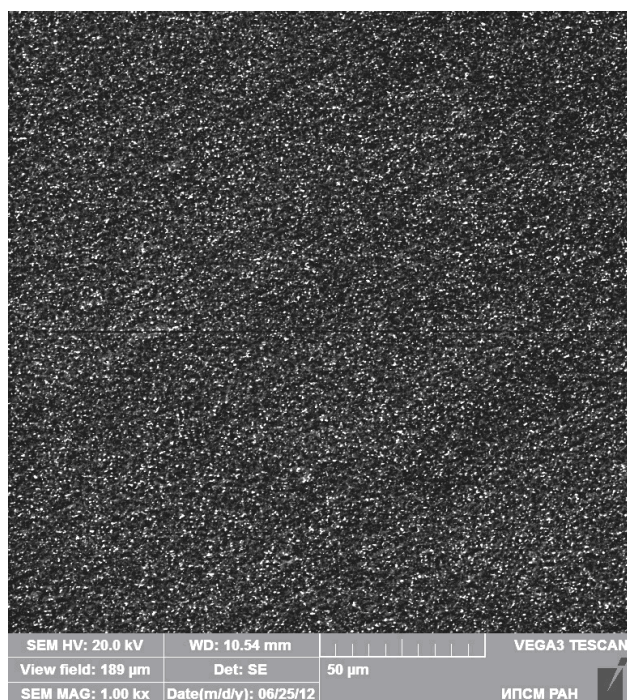


Рис. 6. Микроструктура зоны соединения образцов из НС сплава Ti-6Al-4V при 600°C

В предельном случае бесконечного радиуса кривизны (линейное уменьшение площади поперечного сечения от основы к свариваемой поверхности, рис. 5) энергия деформации составляет 353,706 Дж.

Нормальные напряжения в зоне контакта и цилиндрической части образца распределены более равномерно и меняются от – 1200 МПа до –1090 МПа. Следовательно, радиус кривизны, характеризующий переходную зону от цилиндрической основы образца к свариваемой поверхности, оказывает заметное влияние на характер напряженно-деформированного состояния свариваемого образца и на конечный результат и представляется оптимизируемым параметром анализируемого процесса.

Полученные результаты были использованы для разработки режимов сварки давлением НС сплава Ti-6Al-4V в условиях низкотемпературной СП при температуре 600°C. Испытания на растяжение при комнатной температуре сваренных образцов при температуре 600°C, с поперечным расположением поверхности соединения показали следующие механические свойства: $\sigma_s=1150$ МПа, $\sigma_{0.2}=1082$ МПа, $\delta=13\%$, $\Psi=32\%$, что соответствует свойствам основного материала-свидетеля.

На рис.6 представлена фотография микроструктуры в зоне соединения образцов из НС сплава Ti-6Al-4V при температуре 600°C по оптимизированному режиму. Микропоры в зоне соединения при металлографическом анализе не выявлены.

Таким образом, на основе проведенных экспериментов с использованием компьютерного моделирования показана возможность реализации эффекта низкотемпературной СП при сварке давлением объемных образцов из НС сплава Ti-6Al-4V. Это открывает перспективу для совершенствования технологических процессов СД и СД/СПФ для изготовления конструкций ответственного назначения.

Литература

1. O.A. Kaibyshev, R.Ya. Lutfullin, V.K. Berdin. Doklady Akademii Nauk SSSR. **319**, 615 (1991). (in Russian).
2. O.A. Kaibyshev, R.Ya. Lutfullin, V.K. Berdin. Phys. Met. Metall. **75**, 96 (1993).
3. Comley P.N. Lowering the Heat-The Development of Reduced SPF Temperature Titanium Alloys for Aircraft Production. Materials Science Forum Vols. 447-448, Trans Tech Publications, 2004, pp. 233-238.
4. Salishchev, G. A., Galeev, R. M., Valiakhmetov, O. R., et al., 2000. Highly Superplastic Ti-6Al-4V Sheet. Materials Technology and Advanced Performance Materials, **15**(2), pp. 133-135.
5. Kaibyshev O.A., Lutfullin R.Ya., Safullin R.V., Fatkullin S.N. Materials Science Forum **170 - 172**, 737(1994).
6. Kaibyshev O.A., Lutfullin R.Ya. and Safullin R.V. Proc. of Confer. Current Advances in Mechanical Design and Rroduction, Sixth Cairo University International MDP Conference. 73 (1996).
7. R.Ya. Lutfullin, O.A. Kaibyshev, O.R. Valiakhmetov, M.Kh. Mukhametrakhimov, R.V. Safullin, R.R. Mulyukov, J. of Advanced Materials, **4** (2003) 326.
8. M.Kh. Mukhametrakhimov, R.Ya. Lutfullin. Effect of vacuum annealing on the structure and mechanical properties of the NC alloy VT6., Deformation and Fracture of Materials **10**, 38 (2008) (in Russian).
9. Lutfullin R.Ya., Kaibyshev O.A., Safullin R.V., Valiakhmetov O.R. and Mukhametrakhimov M.H. Superplasticity and Solid State Bonding of Titanium Alloys. Acta Metallurgica Sinica (English Letters). **13** (2), 561(2000).
10. M.Kh. Mukhametrakhimov, R.Ya. Lutfullin. In: Current Status of Theory and Practice of Superplasticity in Materials. Ufa, Gilem 118 (2000) (in Russian).
11. A.A. Presnyakov. localization of plastic deformation. (Mechanical engineering, Moscow, 1983),p. 56 (in Russian).
12. A.K. Galimov, M.Kh. Mukhametrakhimov, R.Ya. Lutfullin, Proceedings of the 7-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. **3**, 328 (2005).