

Влияние пор на механические свойства слоистого материала из титанового сплава ВТ6

Круглов А.А.[†], Мухаметрахимов М.Х., Саркеева А.А.

[†] alweld@go.ru

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

Pore effect on mechanical properties of layered material from VT6 titanium alloy

A.A. Kruglov, M.Kh. Mukhametrakhimov, A.A. Sarkeeva

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

Рассмотрено влияние пор на механические свойства образцов, полученных сваркой давлением листовых заготовок титанового сплава ВТ6. Традиционно считается, что поры в зоне твердофазного соединения являются дефектами, снижающими показатели конструкционной прочности. Результаты испытаний на сдвиг свидетельствуют о снижении сдвиговой прочности соединения с увеличением протяженности пор. Испытания на ударный изгиб показали, что при определенной ориентации поверхностей соединения относительно распространяющейся трещины, поры приводят к повышению ударной вязкости слоистых образцов.

Ключевые слова: сварка давлением, титановый сплав, поры, прочность на срез, ударная вязкость

The effect of pores on mechanical properties of sheet blanks from VT6 titanium alloy obtained by pressure welding is investigated. Pores in the solid-state bonding zone are commonly considered as defects with negative effect on structural strength. Shear tests results indicate a decrease of shear bond strength with increasing length of the pores. Impact tests revealed that presence of pores can increase the value of fracture toughness at a certain orientation of bonding surfaces and propagating crack.

Keywords: pressure welding, titanium alloy, void, shear strength, impact toughness

1. Введение

Анализ многих работ по исследованию сварки давлением (СД) в вакууме титана и его сплавов, показывает, что при несоблюдении оптимальных условий в зоне контакта соединяемых поверхностей могут образоваться дефекты (поры, остатки окисной пленки, включения), которые ориентированы вдоль исходной границы раздела. Размер дефектов, их расположение и количество влияют на механические свойства твердофазных соединений (ТФС) [1-4].

Однако не все виды механических испытаний, применяемых для исследования сварных соединений, позволяют объективно оценивать степень влияния пор на их свойства. В наименьшей степени отрицательное влияние этих дефектов наблюдается при испытаниях на растяжение [1]. При малом количестве пор прочность сварного соединения находится на уровне прочности основного металла, поскольку образцы разрушаются вне зоны ТФС. Только при значительном объеме пор в зоне соединения показатели прочности снижаются, разрушение образца происходит по ТФС. В данном случае для оценки качества ТФС следует использовать значения относительного

сужения, т.е. характеристику пластичности. Из литературных данных следует [1-4], что только испытания на ударный изгиб или срез позволяют оценить влияние пор, ориентированных вдоль первоначальной границы раздела. В работе [2] показано, что показатели ударной вязкости и характер разрушения сварных соединений определяются наличием в зоне ТФС различного вида дефектов. При этом уменьшение количества пор в зоне соединений приводит к повышению ударной вязкости.

В представленной работе рассмотрено влияние относительной протяженности пор в зоне ТФС на сдвиговую прочность сварных двухслойных образцов и ударную вязкость многослойных образцов, полученных сваркой давлением листовых заготовок из титанового сплава ВТ6.

2. Материал и методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран широко используемый в различных областях машиностроения двухфазный титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V) стандартного химического состава в виде листов толщиной ~0,8 мм со средним размером зерен α -фазы ~3 мкм.

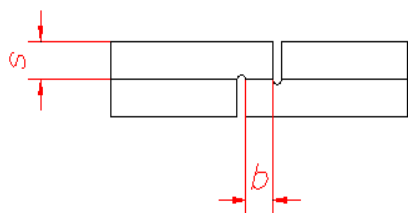


Рис. 1. Поперечное сечение образца для испытаний на срез.

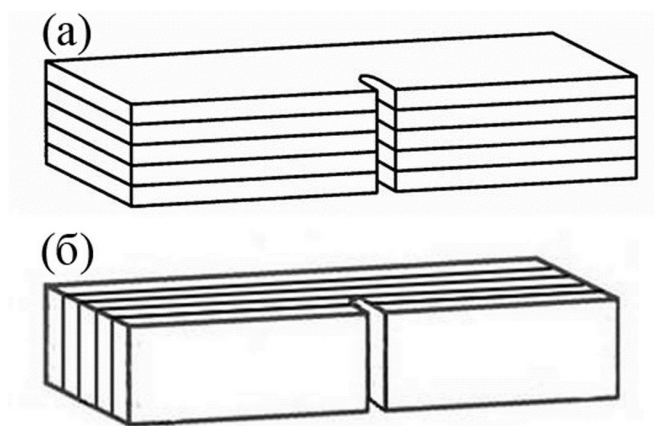
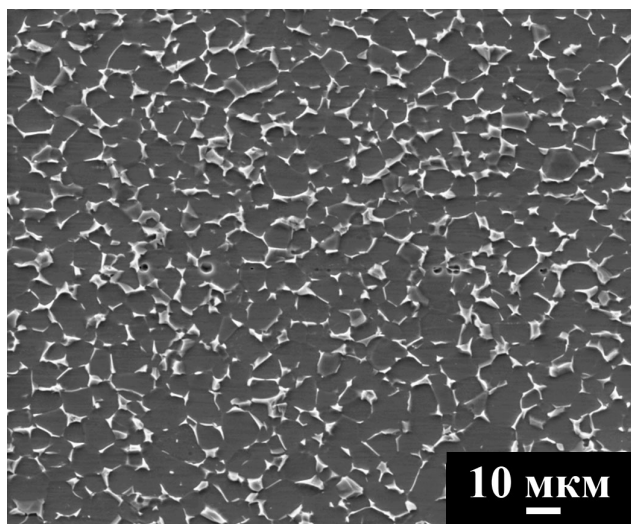


Рис. 2. Образцы для испытаний на ударный изгиб: Р – образец (а) и Т – образец (б).

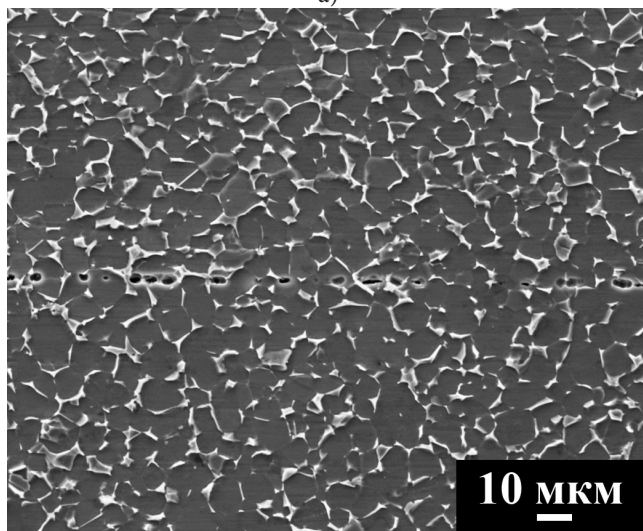
Сварные пакеты изготавливали из двух и тринадцати листовых заготовок с размерами 220х105 мм. Свариваемые поверхности шлифовали, затем полировали на войлочном круге с пастой ГОИ. Перед сборкой поверхности заготовок промывали в ацетоне. Сварку давлением проводили в вакуумной печи ОКБ-8086. Для сварки использовали штамповую оснастку, включающую силовые плиты, рамку, шпильки и клинья. Давление к заготовкам прикладывали с помощью мембраны в виде пакета со штуцером. Глубина вакуума не ниже 0,013 Па. Для получения ТФС с различным количеством пор СД выполняли по режимам, отличающимся по температуре или времени.

Для испытаний на сдвиг из двухслойных пакетов вырезали специальные образцы, эскиз которых приведен на рис. 1. Согласно методике [5] при толщине листовых заготовок $s = 0,8$ мм ширину нахлеста в образцах (б) выбирали равной 0,5 мм. Испытания проводили при комнатной температуре на универсальном динамометре фирмы «Instron» модели 1185 со скоростью деформирования 1 мм/мин.

Для проведения испытаний на ударный изгиб из тринадцати-слойных пакетов вырезали стандартные образцы с размерами 10×10×55 мм³ тип 1 по ГОСТ 9454-84. Образцы отличались расположением U-образного надреза относительно поверхностей ТФС (рис. 2). В образцах с «разветвляющим» трещину расположением поверхностей соединения (Р-образцы) трещина распространяется одновременно через все слои (рис. 1, а), в образцах с «тормозящим» трещину расположением поверхностей соединения (Т-образцы) трещина распространяется последовательно через каждый слой (рис. 1, б) [6].



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура зоны ТФС с протяженностью пор: 0,1 (а) и 0,3 (б).

Относительную протяженность пор (L_p) в зоне ТФС определяли по формуле: $L_p = L_{pi}/L_0$, где L_{pi} – суммарная протяженность пор в плоскости шлифа; L_0 – длина исследуемого участка соединения в плоскости шлифа.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены характерные микроструктуры зоны ТФС образцов с относительной протяженностью пор 0,1 и 0,3.

В таблице 1 приведены результаты испытаний сварных образцов на срез, показывающие, что с увеличением относительной протяженности пор с 0,03 до 0,3 прочность соединения уменьшается незначительно. Снижение прочности произошло всего на 6% при увеличении относи-

Таблица 1.

Результаты испытаний на срез сварных образцов.

Относительная протяженность пор	Прочность соединения на срез, МПа
0,3	450
0,1	470
0,03	480

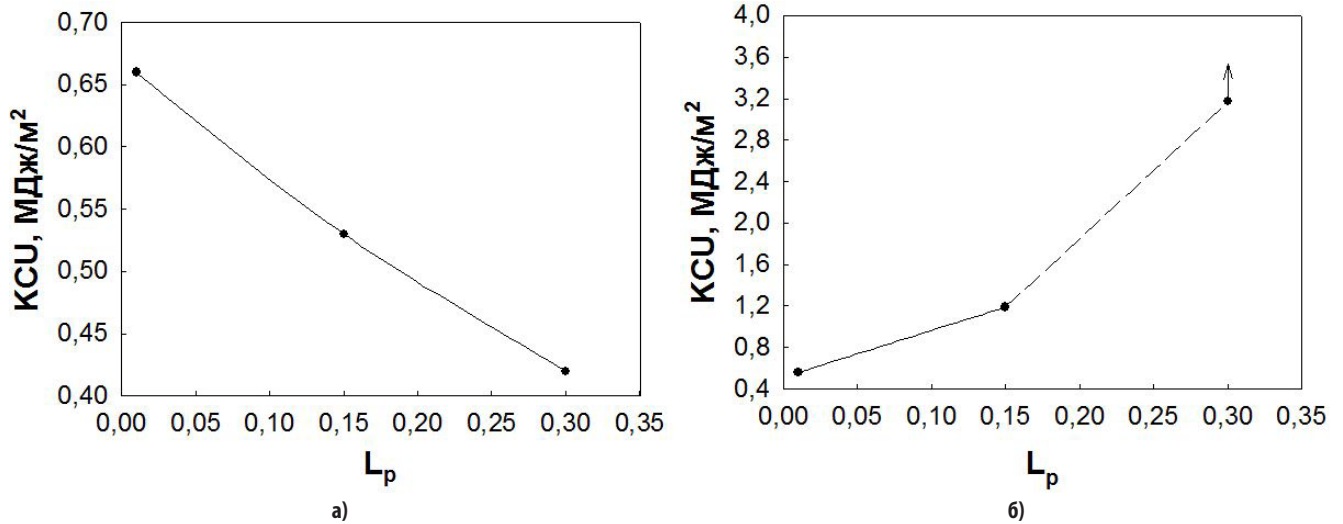


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости от протяженности пор в зоне ТФС в Р-образцах (а) и Т-образцах (б) при комнатной температуре испытаний.

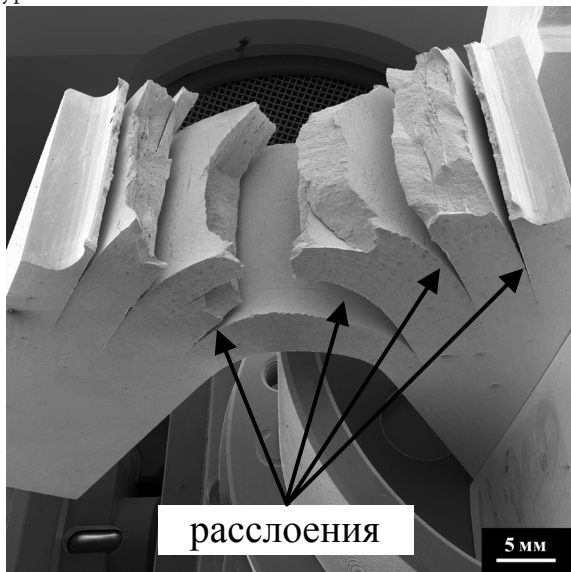


Рис. 5. Излом Т-образца с относительной протяженностью пор в зоне ТФС равной 0,3.

тальной протяженности пор на порядок. Таким образом, прочность на срез является малочувствительной характеристикой к изменению относительной протяженности пор в зоне ТФС.

Результаты испытаний на ударный изгиб образцов представлены на рис. 4. Видно, что с увеличением протяженности пор в зоне ТФС ударная вязкость Р-образцов понижается, Т-образцов повышается. Кроме того, при протяженности пор равной 0,3 Т-образец в результате испытания при комнатной температуре не разрушился. В связи с этим, значение его ударной вязкости было определено по величине работы, затраченной на разрушение и изгиб слоев, и указано на графике точкой со стрелкой.

Поры являются дефектом соединений, полученных сваркой давлением. Наличие пор в зоне ТФС традиционно принято считать отрицательным фактором [2]. Результаты испытаний на срез показали незначительное влияние относительной протяженности пор на прочность ТФС. При этом с повышением пор в зоне ТФС ударная вязкость Р-образцов снижается, а Т-образцов повышается. Такое различие в механическом поведении слоистых образцов связано с траекторией распространения трещины. В Р-образцах трещина проходит одно-

ременно через все слои, а поверхности соединения расположены в направлении распространения трещины. Поскольку наличие пор в зоне ТФС означает несоединенные области, т.е. несплошность материала, то распространение трещин по таким поверхностям соединения существенно облегчается, что проявляется в снижении работы распространения трещины в образцах [7]. Данные обстоятельства и объясняют снижение ударной вязкости Р-образцов с повышением пористости в зоне ТФС.

В Т-образцах поверхности соединения расположены перпендикулярно направлению распространения магистральной трещины, и ей необходимо последовательно преодолевать каждый слой. При наличии пор в зоне ТФС трещина, достигая поверхность соединения, отклоняется от своего магистрального направления, поскольку распространяется в наиболее легком направлении – по поверхности соединения порами. Для дальнейшего процесса разрушения необходимо повторное зарождение трещины на новой поверхности, образованной в результате расслоений, для чего требуется дополнительная энергия [8]. Соответственно, чем больше пор, тем более эффективным барьером становятся поверхности ТФС. Полученные результаты испытаний подтверждают данное предположение. При относительной протяженности пор равной 0,15 образцы разрушились, а при протяженности пор равной 0,3 энергии удара на полное разрушение образца оказалось недостаточным, в результате часть слоев разрушилась, а часть только изогнулась (рис.5). Наблюдаемый в результате испытаний образцов с повышенной протяженностью пор в зоне ТФС пластический изгиб слоев, в которых развивается большая пластическая деформация, также обуславливает высокие значения ударной вязкости.

Эффект повышения сопротивления ударному разрушению слоистого материала за счет пор может быть использован при изготовлении многослойных изделий из титановых сплавов, которые в процессе эксплуатации подвергаются ударным нагрузкам. К таким изделиям относятся бронеэлементы, защитные каски, корпуса, включая корпус авиационного двигателя, лицевые пластины головки клюшки для игры в гольф, изготавливаемые с помощью СД.

Максимально допустимая величина пор в зоне ТФС должна выбираться из условий обеспечения конструкционной прочности конкретного изделия с учетом эксплуатационных нагрузок. Исходя из этих данных, появляется возможность при изготовлении изделий снизить температуру и/или время СД, ослабить требования к методам неразрушающего контроля качества сварных соединений, упростить способ подготовки свариваемых поверхностей заготовок.

5.3. Заключение

1. Результаты испытаний на срез образцов из слоистого материала, полученного сваркой давлением листовых заготовок из титанового сплава ВТ6, показали, что с увеличением протяженности пор прочность твердофазного соединения снижается незначительно.

2. Результаты испытаний на ударный изгиб показали, что с увеличением протяженности пор ударная вязкость образцов при одновременном распространении трещины через все поверхности соединения уменьшается, а при последовательном распространении трещины через поверхности соединения возрастает.

Литература

1. S.M. Gurevich, V.N. Zamkov, V.E. Blashchuk. Metallurgy and welding technology of titanium and his alloys. Kiev, Naukova dumka (1986) 240 p. (in Russian) [С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блащук и др. Металлургия

и технология сварки титана и его сплавов. К.: Наукова думка (1986), 240 с].

2. A.A. Gelman, K.D. Anurev, N.M. Semenova, L.M. Zaitseva. Welding Fabrication 10, 16 (1985) (in Russian) [А.А. Гельман, К.Д. Анурьев, Н.М. Семенова, Л.М. Зайцева. Сварочное производство 10, 16 (1985)].
3. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials 1, 59 (2011) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. Письма о материалах 1, 59 (2011)].
4. E.S. Karakozov. Pressure Welding of Metals. Moscow, Machine-Building, (1986) 280 p. (in Russian) [Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.].
5. I.V. Kazachkov, V.K. Berdin. Zavodskaya Laboratoria 55 (7), 82 (1989) (in Russian) [И.В. Казачков, В.К. Бердин. Заводская лаборатория 55 (7), 82 (1989)].
6. Embury J.D., Petch N.J., Wraith A.E., Wright E.S. The fracture of mild steel laminates // Trans, of Metall. S. AIME, 1967, v. 239, p. 114-118.
7. A.A. Sarkeeva, A.A. Kruglov, E.M. Borodin, S.V. Gladkovsky, R.Ya. Lutfullin. Phys. Mesomech. 15 (5), (2012) (in Russian) [Саркеева А.А., Круглов А.А., Бородин Е.М., Гладковский С.В., Лутфуллин Р.Я. Физ. мезомех. Т.15 (5), (2012)].
8. P.G. Miklyaev, Ya.B. Fridman. Anisotropy of mechanical properties. Moscow, Metallurgy (1986) 224 p. (in Russian) [П.Г. Микляев, Я.Б. Фридман. Анизотропия механических свойств металлов. М., Металлургия (1986) 224 с.].