

УДК 620.18:669-419:621.771+621.772

А.И. Плохих

МГТУ им. Н.Э. Баумана

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Представлены результаты исследования по созданию многослойных металлических материалов конструкционного назначения. На основании анализа литературы установлено, что основным сдерживающим фактором при создании баллонов высокого и сверхвысокого давления являются соображения безопасной эксплуатации. Одним из параметров, определяющих надежную и безопасную работу, является безосколочность разрушения баллона, которая определяется совокупностью высоких значений ударной вязкости и трещиностойкости материала. Этим объясняется ограниченное использование существующих высокопрочных конструкционных материалов для создания легких баллонов высокого давления. В работе показано, что перспективным подходом в решении задачи по созданию бесшовных баллонов может оказаться использование многослойных (от 100 до 2000 слоев) материалов на основе конструкционных сталей. Получение такой структуры в материале, созданном на основе одного металла, возможно в том случае, если в исходной композиции участвуют сплавы, имеющие различное кристаллическое строение. Характерной чертой таких материалов является необычное сочетание механических свойств. При весьма низкой пластичности вдоль направления проката запас ударной вязкости в направлении, перпендикулярном направлению проката, оказывается весьма значительным. Представленные результаты исследований, по мнению автора, позволяют надеяться на использование подобных материалов для изготовления баллонов высокого давления в будущем.

Ключевые слова: баллоны высокого давления, многослойные металлические материалы, композиционные материалы, сталь, горячая прокатка, текстура, диффузия, микроструктура, механические свойства, ударная вязкость.

A.I. Plokhikh

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman

THE POSSIBILITY OF MULTILAYER METALLIC MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF HIGH PRESSURE CYLINDERS

The paper presents the results of a study on the creation of multilayer metallic materials for constructional purposes. Based on the literature review found that the main limiting factor in creating containers high and ultrahigh pressure are considerations for safe operation. One of the parameters that determine the safe and reliable operation is shatterproof bottle of destruction, which is defined by a set of high values of impact strength and fracture toughness of the material. This explains the limited use of existing high-strength structural materials for lightweight high pressure cylinders. We show that a promising approach to solving the problem by creating seamless cylinders may be using multilayer (from one hundred to two thousand layers) materials based on structural steels. Preparation of such a structure, the material that is based on one of the metal may in particular if the initial composition involved alloys having different crystal structure. A characteristic of such materials is an unusual combination of mechanical

properties. At very low ductility along the rolled stock in impact strength in the direction perpendicular to the rolling direction is significant. The investigation results, according to the author, give hope for the possible use of such materials for the manufacture of pressure vessels in the future.

Keywords: high pressure cylinder, multilayer metal materials, composite materials, steel, hot rolling, texture, diffusion, microstructure, mechanical properties, impact strength.

Современная тенденция повышения энерговооруженности автономных систем требует решения задачи повышения емкости энергетических источников. К источникам энергии, способным аккумулировать энергию сжатых газов, относятся баллоны высокого и сверхвысокого давления, эффективность применения которых определяется отношением массы баллона к его объему. Чрезвычайно высокая потребность в подобных устройствах наблюдается при эксплуатации космической и авиационной техники, подводных аппаратов. Так, на борту современного истребителя установлены десятки баллонов высокого давления. В основном это традиционные металлические баллоны, которые по современным понятиям имеют весьма ограниченные технико-эксплуатационные характеристики. Отношение массы к объему при заданном коэффициенте прочности у таких баллонов составляет 1,3–2,0 кг/л. У композитных баллонов, изготовленных с использованием специальной намотки из полимерных волокон, при более высоких прочностных характеристиках соотношение массы и объема составляет 0,2–0,8 кг/л, что может обеспечивать снижение веса изделия в 2–3 раза [1]. Однако практически во всех композитных баллонах высокого давления, усиленных намоткой, используется тонкостенный лейнер из стали, роль которого состоит в обеспечении герметичности баллона.

Основным сдерживающим фактором при создании баллонов высокого и сверхвысокого давления являются соображения безопасной эксплуатации. Одним из параметров, определяющих надежную и безопасную работу, является безосколочность разрушения баллона, которая определяется совокупностью высоких значений ударной вязкости и трещиностойкости материала. Эти величины, как известно, напрямую зависят от параметров структуры материала, а также его пластических характеристик, имеющих общую тенденцию к снижению по мере роста предела прочности. Именно этим фактором объясняется ограниченное использование существующих высокопрочных конструкционных материалов для создания легких баллонов высокого давления.

Как показывает практика, весьма перспективным при создании передовых образцов современной техники остается разработка и использование материалов, характерной особенностью которых является наличие градиентной макро- либо микроструктуры. Использование подобных материалов позволяет наиболее эффективно решать задачу оптимизации габаритно-весовых параметров изделий.

Перспективным подходом в решении задачи по созданию бесшовных баллонов может оказаться использование многослойных (от 100 до 2000 слоев) материалов на основе конструкционных сталей. Проведенные исследования показали, что получение такой структуры в материале, созданном на основе одного металла, возможно в том случае, если в исходной композиции участвуют сплавы, имеющие различное кристаллическое строение (решетки ОЦК и ГЦК). Номенклатура технически значимых сплавов существенно расширяется, если в качестве основного вида обработки, в отличие от известных технологических схем [2, 3], использовать горячую пакетную прокатку [4–6]. Вместе с тем синтез подобных материалов является задачей достаточно сложной. Требуется учет многих факторов, оказывающих влияние как на процесс формирования ламинарной структуры на стадии горячей прокатки, так и на ее стабильность, включая межслойную диффузию легирующих элементов [7].

Одним из главных условий, позволяющим наследовать исходное ламинарное строение первичной заготовки от одного технологического цикла к другому, является предотвращение структурной перекристаллизации на межслойных границах. В отличие от традиционных многослойных материалов (би-, триметаллов), в которых образование общих зерен на границах раздела приветствуется, в материалах с ламинарной структурой это является недопустимым. Нарушение регулярного расположения слоев вследствие исчезновения высокоугловой разориентировки между ними делает невозможным постепенное утонение слоев деформацией прокатки.

Исследование структуры и механических свойств многослойных материалов было проведено на образцах, полученных в соответствии с разработанными схемами выбора исходных композиций заготовок и экспериментальным технологическим маршрутом (рис. 1).

Первичные композитные заготовки были составлены из 100 чередующихся между собой слоев толщиной 0,5 мм по 50 каждой марки стали 08X18 и 08X18H10, У8 и 08X18H10, а также 40X13 и 08X18H10. Изуче-

ние микроструктуры образцов показало, что после реализации первого технологического цикла в листовой заготовке толщиной 2 мм в поперечном и продольном сечениях относительно направления прокатки формируется ламинарная структура, которая характеризуется параллельным расположением слоев, имеющих толщину ~20 мкм (рис. 2, а).

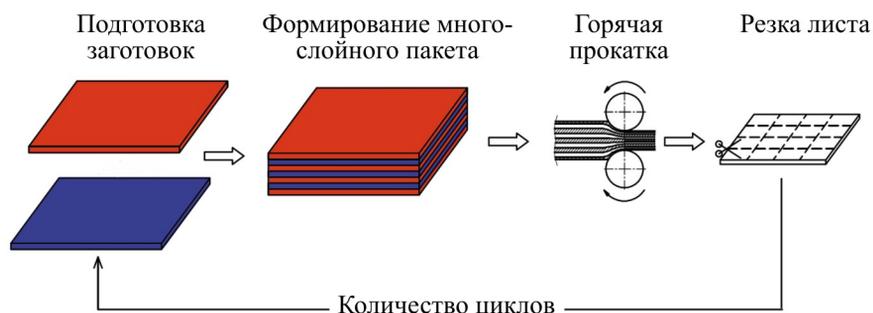


Рис. 1. Технологический маршрут

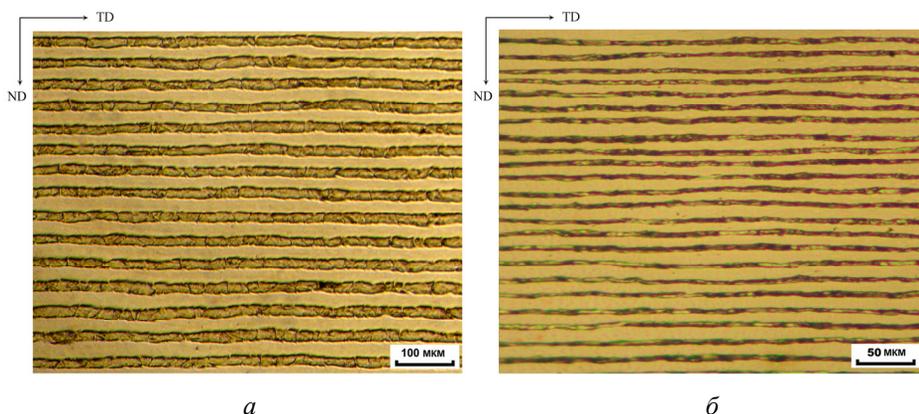


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения многослойного образца (микроскоп Neophot): а – первый технологический цикл, толщина образца 2 мм; б – второй технологический цикл, толщина образца 10 мм

Реализация второго технологического цикла показала, что в образцах исследованных композиций ламинарная структура успешно наследуется на разных стадиях передела (рис. 2, б, рис. 3).

При этом микродифракционный анализ структуры образца композиции У8 + 08Х18Н10, прошедшего второй технологический цикл, показал, что полученный материал имеет выраженную слоистую структуру с преимущественной кристаллографической ориентировкой в отдельных кристаллитах с толщиной слоев 0,8–1,0 мкм.

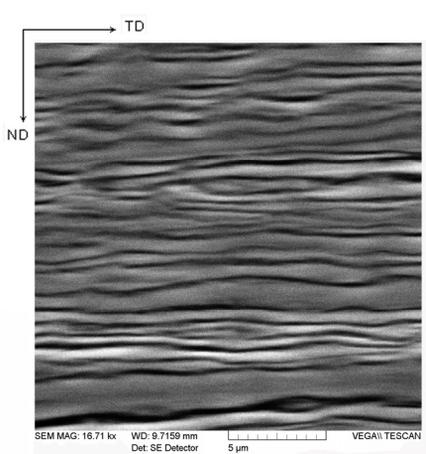


Рис. 3. Электронное изображение микроструктуры образца композиции 08X18 + 08X18N10, толщина образца 2 мм (микроскоп VEGA TS5130)

Установлено, что слои отделены друг от друга большими угловыми границами с разориентировкой не менее 15° , при этом в пределах каждого слоя кристаллографическая ориентировка практически не изменяется и не превышает 5° (рис. 4).

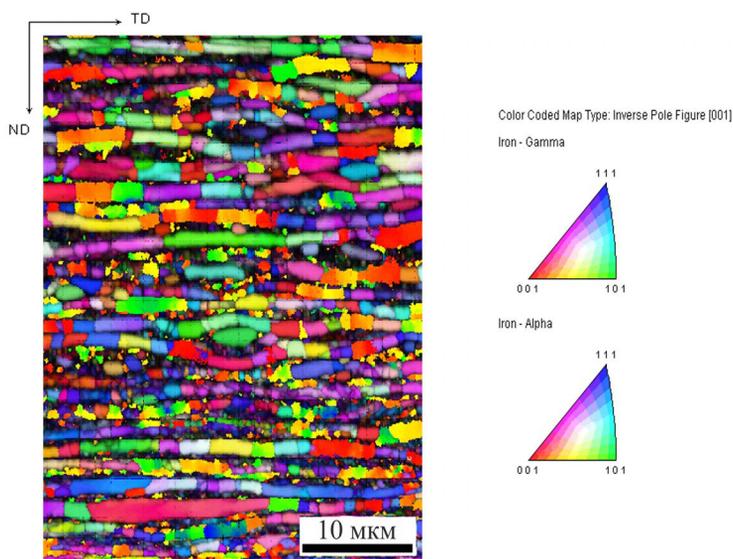


Рис. 4. Восстановленная карта ориентировок кристаллитов в слоях образца многослойной композиции У8 + 08X18N10. Кристаллографическая ориентация слоев соответствует раскраске инверсного треугольника, анализ проведен в обратноотраженных электронах (микроскоп Quanta 200 3D FEG)

Исследование механических свойств образцов композиций показывает, что благодаря формированию многослойной ламинарной структуры наблюдается весьма необычное сочетание механических характеристик (табл. 1). Можно видеть, что полученная структура состоит, судя по значениям модуля упругости, из текстурированных слоев и формируется непосредственно в процессе первого технологического цикла. Характерным для данного типа конструкционных материалов является и то, что незначительное повышение предела прочности сопровождается резким падением характеристик пластичности с одновременным ростом твердости.

Таблица 1

Механические свойства образцов исследованных композиций
исходное состояние: прокатка при температуре 1000 °С, толщина
проката 2 мм

Материал многослойного образца	Цикл	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	НВ
			МПа		%		
08X18 + 08X18N10	1	160	520	780	7,0	43	180
	2	170	660	800	4,5	48	370
У8 + 08X18N10	1	150	560	960	7,0	44	110
	2	180	880	1470	4,0	18	450
40X13 + 08X18N10	1	150	970	1250	3,5	28	260
	2	180	860	1280	1,0	16	440

Объяснить это можно с помощью схемы и электронного изображения места разрыва образца на растяжение (рис. 5). Можно видеть, что удлинение образца и его разрушение, происходящее по известному механизму образования «внутренних шеек», лимитируется величиной поперечного сечения одного слоя. При этом, судя по результатам исследования, чем тоньше слои в материале, тем меньшие значения относительного удлинения и сужения в целом всего образца можно ожидать.

Наряду с этим запас ударной вязкости в этих материалах в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, оказывается весьма значительным. Для оценки влияния слоистой структуры на величину ударной вязкости в соответствии с ГОСТ 9454–78 были испытаны стандартные образцы IV типа размером 2×8×55 мм, с V-образным концентратором. Это было сделано в связи с тем, что полноразмерные образцы с U-образным концентратором копром мощностью 300 Дж

не разрушались. Образцы были вырезаны из горячекатаной полосы (рис. 6). Установлено, что образцы всех исследованных композиций, прошедших второй технологический цикл обработки, не подвергаются разрушению (рис. 7, а).

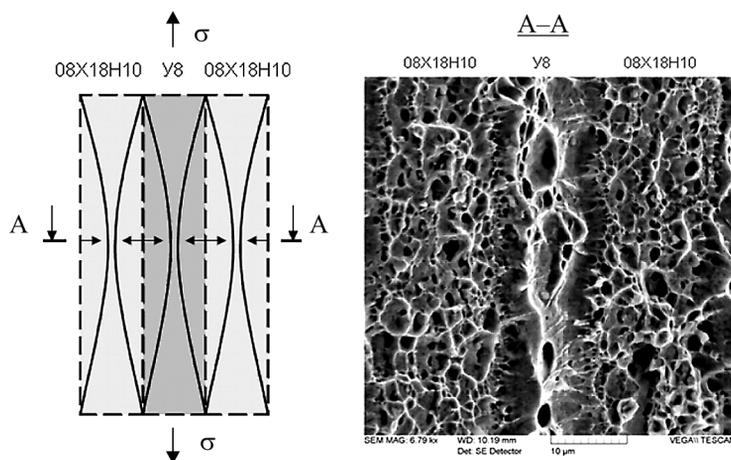


Рис. 5. Схема испытания многослойного образца на растяжение:
A–A – место разрыва образца

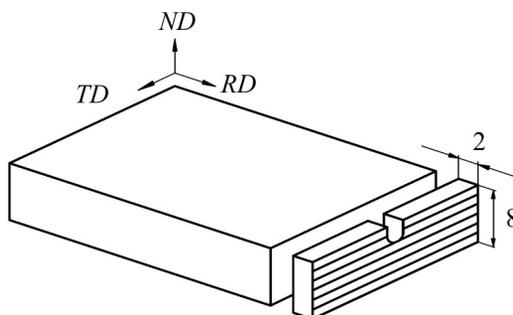


Рис. 6. Схема вырезки ударных образцов

Фрактографический анализ поверхности части образца, претерпевшего разрушение, показывает, что механизм формирования излома практически аналогичен механизму разрушения при растяжении образца (рис. 7, б). Можно видеть, что поперечный удар приводит к растяжению слоев с образованием места разрушения типа «лезвие ножа», которое, как известно, сопровождается вязким разрушением. При этом можно заметить, что отделение слоев друг от друга также происходит вязко, с образованием характерного ямочного излома.

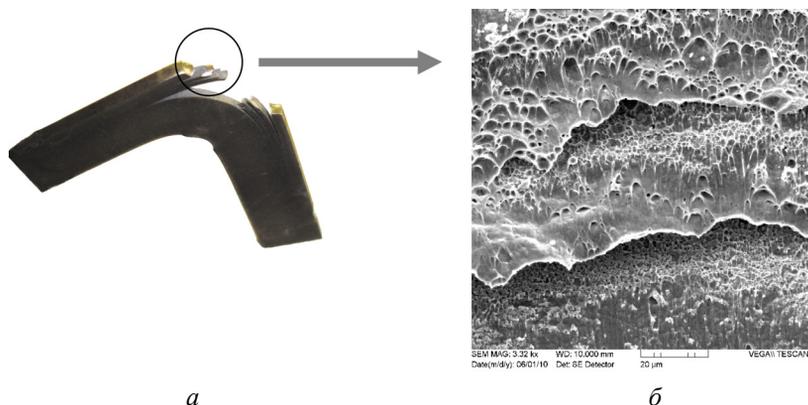


Рис. 7. Излом ударного образца композиции 08X18 + 08X18Н10 (второй технологический цикл, $T_{исп} = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$): а – вид ударного образца после испытания; б – поверхность излома

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что значения ударной вязкости (работы деформации) увеличиваются от цикла к циклу весьма значительно (табл. 2). Максимальное увеличение, почти в три раза, наблюдается для композиции У8 + 08X18Н10.

В то же время анализ нормативных документов показывает¹, что значения относительного удлинения, полученные в исследованных материалах после завершения второго технологического цикла, являются весьма низкими. Так, материал баллона должен иметь уровень механических свойств не ниже приведенных в табл. 3.

Таблица 2

Ударная вязкость образцов исследуемых композиций (во всех случаях образец не разрушен)

Материал многослойного образца	Цикл	KCV, Дж/см ²
08X18 + 08X18Н10	1	160*
	2	280*
	3	360*
У8 + 08X18Н10	1	80
	2	230*
40X13 + 08X18Н10	1	100
	2	250*

* Условное значение, учитывая отсутствие полного разрушения образца.

¹ ГОСТ 949–73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P_r \leq 19,6\text{ МПа}$ (200 кгс/см²). Технические условия (с изменениями и поправками 1976, 1981, 1982, 1986, 2001 и 2002 г.).

Таблица 3

Механические свойства материала баллона в соответствии с ГОСТ 949–73

Материал баллона	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %, не менее	КСУ, Дж/см ²
Углеродистая сталь	373	638	15	29,4
Легированная сталь	687	883	10,0	98,1

Парадоксальность ситуации заключается в том, что указанные в табл. 3 механические свойства соответствует некоторому уровню конструкционной (конструктивной) прочности. Она включает в себя наряду с характеристиками прочности также характеристики пластичности и вязкости, которые обеспечивают надежную и безопасную работу изделия, в данном случае баллона, в целом. При этом основным параметром безопасной эксплуатации по-прежнему остается безосколочность разрушения, которая в нашем случае реализуется за счет специального вида ламинарной структуры.

Безусловно, требования ГОСТ 949–73 являются обязательными, и в первую очередь обязательными для производителей баллонов. Вместе с тем представленные результаты исследований, по нашему мнению, позволяют надеяться на возможное использование подобных материалов для изготовления баллонов высокого давления в будущем.

Список литературы

1. Рубан А.Г. Анализ характеристик баллонов высокого давления для сжатых газов // Технические газы. – 2009. – № 2. – С. 48–55.
2. Возможности метода вакуумной прокатки как способа получения многослойных композитов с нанометрическими толщинами слоев / М.И. Карпов, В.И. Внуков, К.Г. Волков [и др.] // Материаловедение. – 2004. – № 1. – С. 48–53.
3. Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding / Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R.G. Hong // Process. Scripta Mater. – 1998. – 39. – P. 1221–1227.
4. Исследование особенностей формирования субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки / А.Г. Колесников, А.И. Плохих, Ю.С. Комиссарчук, И.Ю. Михальцевич // МиТОМ. – 2010. – № 6. – С. 44–49.

5. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки / Т.И. Табатчикова, А.И. Плохих, И.Л. Яковлев, С.Ю. Ключева // ФММ. – 2013. – Т. 114, № 7. – С. 633–646.

6. Исследование многослойного материала на основе нержавеющей сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки / Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.И. Плохих, С.Ю. Дельгадо Рейна // ФММ. – 2014. – Т. 115, № 4. – С. 431–442.

7. Исследование влияния диффузионной подвижности легирующих элементов на стабильность структуры многослойных металлических материалов / А.И. Плохих, Д.В. Власова, О.М. Ховова, В.М. Полянский [Электронный ресурс] // Наука и образование. – 2011. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/262116.html> (дата обращения: 3.11.2011).

Получено 10.11.2014

Плохих Андрей Иванович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: plokhikh@bmstu.ru

Plokhikh Andrei (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman; e-mail: plokhikh@bmstu.ru