

В стандартной стали P18 карбидное превращение при отпуске происходит идентично, т. е. единственной наблюдаемой карбидной фазой является цементит, при этом с матрицей реализуется ориентационное соотношение Багаряцкого.

## Выводы

1. Проведена оценка микронапряжений кристаллической решетки твердого раствора в зависимости от температуры отпуска. Установлено, что максимальная напряженность кристаллической решетки и наивысшие показатели микротвердости для сплава типа 20P18, соответствуют отпуску при температуре 550-560 °С.

2. Электронномикроскопическими исследованиями установлено, что в комплексно обработанном сплаве типа 20P18 после окончательной термической обработки (закалка и отпуск) протекают процессы аналогичные происходящим в стандартной быстрорежущей стали P18. В диффузионном слое после отпуска выделяются мелкодисперсные карбиды типа  $M_3C$ , характерные и для стандартной быстрорежущей стали, но в большем количестве. Поскольку выделение карбида  $M_3C$  из мартенсита при отпуске происходит в интервале температур 250-300 °С, то его образование не является причиной вторичного твердения исследуемого сплава.

3. Отсутствие рефлексов от специальных карбидов на микроэлектроннограммах от отпущенного комплексно обработанного сплава типа 20P18, позволило установить, что максимуму вторичной твердости высоколегированных железных сплавов соответствует стадия образования зон предвыделе-

ния типа Гинье-Престона, что отвечает отпуску при температуре 550-560 °С.

## Библиографический список

1. Пат. 71705 Украина, МПК C21D 9/22. Спосіб комплексної обробки литого металорізального інструменту / Ю. С. Проїдак (UA), О. В. Мовчан (UA), С. І. Губенко (UA), А. П. Бачурін (UA), К. О. Черноиваненко (UA). – № u2011 15570; Заявл. 29.12.2011; Опубл. 25.07.2012; Бюл. № 14. – 4 с.

2. Черноиваненко Е. А. Получение композитной структуры в приповерхностном слое инструмента на базе литой быстрорежущей стали P6M5 / Е. А. Черноиваненко, С. И. Губенко, А. В. Мовчан, А. П. Бачурин // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка». – 2011. – № 4. – Т. 19. – С. 188-192.

3. Губенко С. И. Применение химико-термической обработки с целью повышения стойкости литого режущего инструмента / С. И. Губенко, А. П. Бачурин, Е. А. Мовчан // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка». – № 14. – Т. 2. – 2010. – С. 36-40.

4. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный анализ: индентирование рентгенограмм: [справочное руководство] / Лев Иосифович Миркин. – М.: Наука, 1981. – 796 с.

5. Горелик С. С. Рентгенографический и электронографический анализ металлов / Горелик С. С., Расторгуев А. Н., Скаков Ю. А. – М.: Металлургия, 1963. – 218 с.

Поступила 27.12.2013

УДК 669.295:620.251.1

Бабенко Е. П. /к. т. н./

ДНУ им. Олеса Гончара



Долженкова Е. В. /к. т. н./

ДНУ им. Олеса Гончара

Наука

## Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава VT23

*Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава VT23*

*Проведены исследования микроструктуры и фазового состава сплава в бракованном изделии методами: металлографии, рентгенографии, химического травления и микрорентгеноспектральным зондированием. Предположено, что разрушение произошло по причине неравномерного перераспределения легирующих элементов в объеме зерна. Рассмотрены варианты попадания примесей внедрения в металл. Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 5 назв.*

**Ключевые слова:** *неметаллические включения, крупногабаритные изделия, средство титана к газам, примеси внедрения, легирующие элементы*

*Researches of microstructure and phase composition of alloy in defective product are conducted the methods: of metallography, sciagraphies, chemical etch and mikrorentgenospektralym sensing. It is supposed that destruction happened by reason of uneven redistribution of alloying elements in the volume of grain. The variants of hit of admixtures of introduction are considered in metal.*

**Keywords:** *non-metallic inclusions, bulky items, the affinity of titanium to gases, interstitial impurities, alloying elements*

При эксплуатации современных механизмов, где некоторые детали изготовлены из титановых сплавов, как правило, возникают динамические знакопеременные нагрузки. Для того чтобы их вы-

держивать титановые изделия должны иметь высокий уровень механических свойств и характеристик. Современная технология получения слитков титановых сплавов, несмотря на высокое средство

титана к газам, позволяет получить качественный металл. Однако при нарушении технологического процесса производства в слитках иногда обнаруживают дефекты.

Разрушение деталей небольшого сечения (до 0,06 м) не влечет, как правило, серьезных аварий, но при разрушениях крупногабаритных изделий, возникают большие проблемы с серьезными последствиями и огромными материальными потерями.

Степень химической и структурной однородности в титановых сплавах является настолько важной характеристикой, что любые несовершенства оказываются концентраторами, снижающими прочность и долговечность изделий. Высокая активность титана приводит к протеканию физико-химических процессов взаимодействия с газами даже в твердом состоянии. Поэтому неметаллические включения, в частности гидриды, нитриды, оксиды, могут образовываться как в процессе выплавки слитков, так и на различных этапах технологического передела в готовую продукцию.

Машиностроительному заводу переданы на исследования образцы от бракованной детали. Предполагали, что одной из возможных причин ее разрушения могли быть неметаллические включения.

Одним из основных структурных несовершенств титановых сплавов является наличие неметаллических включений [1]. Вопрос возможного формирования неметаллических включений в титановых сплавах на разных этапах производства крупногабаритных изделий последовательно, по всей технологической цепочке, от получения губчатого титана до готового изделия изучен не систематически. Неметаллические включения в готовое изделие могут быть внесены шихтовыми материалами, образованы при изготовлении расходных электродов в процессе плавки, а также сформированы в процессе термической обработки готового изделия.

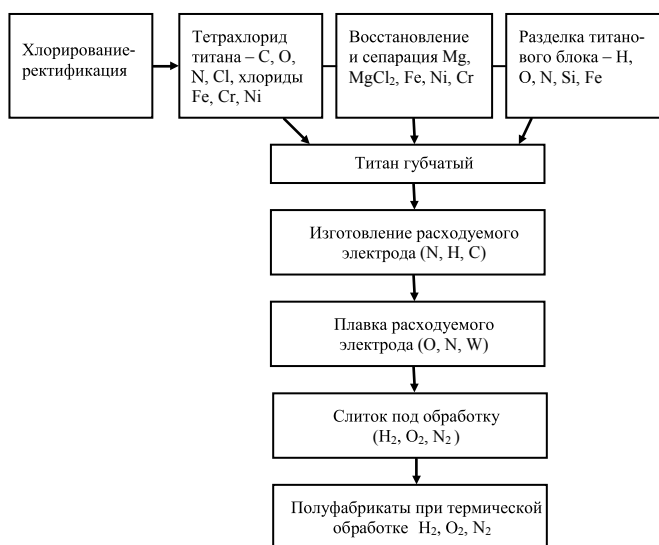


Рис. 1. Схема возможных источников загрязнения титановых сплавов газами

Получение титана высокой чистоты связано с трудностями, обусловленными его высокой чувствительностью к примесям внедрения, особенно к кислороду, азоту, водороду, углероду и взаимодействием с большинством восстановителей, в результате чего образуются твердые растворы или химические соединения. На рис. 1 представлена схема возможного насыщения сплава примесями внедрения в процессе изготовления изделия из титана [2].

Анализ схемы показывает:

- возможное образование и рост неметаллических включений происходит при закладке исходных продуктов;
- внесение основной части металлических и неметаллических примесей в губчатый титан обусловлено технологией его изготовления;
- состав вносимых примесей при последующем получении полуфабрикатов из титановой губки остается неизменным (в основном это примеси внедрения: кислород, водород, азот). Их количество зависит от температурных режимов обработки и увеличивается от передела к переделу.

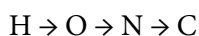
Необходимо отметить, что примеси в титановом блоке распределены неравномерно – периферийные зоны содержат их в большем количестве, чем центральные. Следовательно, некоторая неоднородность губчатого титана по содержанию примесей заложена в технологии его получения. В губчатом титане присутствуют кислород, азот, водород, кремний, хлор. Эти примеси в конечном итоге определяют качество и свойства титановой губки и сплавов [3].

В целях обнаружения неметаллических включений металлургического происхождения изучено большое количество образцов крупногабаритных штамповок сплава ВТ23, отобранных от разных их частей. Для определения их использовали современные методы исследования: металлографический, химического травления, рентгенографический, микрорентгеноспектрального зондирования.

В слитках, при выплавке которых использовали губку низкого качества, обнаружены включения серого цвета, содержащие до 2,2 % O<sub>2</sub> и до 0,8 % N<sub>2</sub>. Микротвердость этих включений в 2-3 раза превышала микротвердость основного металла. К числу возможных причин образования включений, обогащенных азотом, кислородом является сварка слитков первого передела с применением недостаточно очищенного аргона. Значительная неоднородность распределения кислорода в α-твердом растворе титановых сплавов может быть обусловлена расположением атомов в дефектах и несплошностях кристаллической решетки, дислокациях.

В процессе термической обработки крупногабаритных изделий из сплава ВТ23, которая заключается в нагреве до 875 °С, выдержке в течение 1 ч, охлаждении – обдуве вентилятором, и старении при 450 °С с выдержкой в течение 5 ч возможно активное насыщение металла газами (водородом, кислородом и азотом).

Для установления взаимодействия титана с газовыми примесями, которые обладают разными скоростями диффузии, нами рассмотрена последовательность снижения их скорости движения с поверхности вовнутрь изделия:



$$1,5 \rightarrow 1,6 \rightarrow 1,2 \rightarrow 0,5 \quad \times 10^{-9} \text{ м/с}$$

Известно [4], что примеси внедрения в титане размещаются в октаэдрических и тетраэдрических пустотах. В  $\alpha$ -титане октаэдрические и тетраэдрические поры имеют размеры 0,062 нм и 0,34 нм, а в  $\beta$ -титане – 0,022 нм и 0,041 нм, соответственно. Авторы полагают, что атомы внедрения по-разному располагаются в порах  $\alpha$ - и  $\beta$ - титана [5].

Как видно (табл. 1), только водород и кислород имеют примерно одинаковые скорости диффузии в  $\alpha$ -титане. При термической обработке, когда она происходит в двухфазной области, и в районе температуры полиморфного превращения, где скорость диффузии газов очень высока, необходимо учитывать размеры возбужденных газовых ионов и размеры пор. К тому же скорость диффузии газовых атомов в титане различна.

**Таблица 1. Размещение примесей внедрения в кристаллической решетке сплава ВТ23**

Показатели	Титан		Водород	Кислород	Азот	Углерод
Атомный радиус элемента, нм	0,145		0,041	0,068	0,074	0,77
Радиус поры, нм	$\alpha$ -Ti	Октаэдр.	0,062	-	+	+
		Тетраэдр	0,034	-	-	-
	$\beta$ -Ti	Октаэдр.	0,022	-	-	-
		Тетраэдр	0,041	+	-	-
Растворимость газов в титане, %	$\alpha$ -Ti	-	7,9	66,7	21,4	При нагреве 1-1,9 %
	$\beta$ -Ti	-	44,0	5,5	6,5	882 °С – 0,6 %; 1750 °С – 3,1 %
Коэффициент диффузии газа в титане, м <sup>2</sup> /с	$\alpha$ -Ti	-	$1,5 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$7,9 \times 10^{-7}$
	$\beta$ -Ti	-	$2,0 \times 10^{-9}$	$0,7 \times 10^{-10}$	$0,7 \times 10^{-10}$	$3,18 \times 10^{-7}$

+ – поры, где размещаются примеси внедрения;

- – поры, где отсутствуют примеси внедрения в кристаллической решетке.

Из табл. 1 следует, что скорость диффузии атома водорода высокая как в  $\alpha$ -Ti, так и в  $\beta$ -Ti по сравнению со скоростями диффузии других элементов внедрения. Такой атом, попадая в октаэдрическую пору  $\alpha$ -титана, где размер ее значительно больше, чем размер самого атома водорода, под действием колебательных движений свободно покидает пору при повышенных температурах. В тетраэдрическую пору  $\alpha$ -титана атом водорода при комнатной темпе-

ратуре не может проникнуть, так как она для него мала. Этим вызвана низкая растворимость водорода в  $\alpha$ -титане. В  $\beta$ -титане наоборот: октаэдрические поры (0,022 нм) для водорода слишком маленькие, а тетраэдрические (0,041 нм) соизмеримы с размером ионизированного атома.

Кислород тоже имеет высокую скорость диффузии  $1,6 \times 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, но радиус его атома только на 10 % больше размера октаэдрической поры и на 54,8 % больше тетраэдрической поры  $\alpha$ -Ti. Внедряясь в решетку  $\beta$ -Ti, атом кислорода по размеру в три раза больше октаэдрической поры и на 60,3 % – тетраэдрической поры. Потому он находится в основном в  $\alpha$ -титане, а не в  $\beta$ -титане. К тому же на образование оксида титана необходимо затратить на порядок величины больше энергии (519,14 Дж/моль), чем на образование гидрида титана (43,6 Дж/моль). Азот, углерод имеют меньшие значения скорости диффузии в кристаллической решетке титана, причем энтальпии соединений этих элементов с титаном значительно выше, чем у гидридов титана. Поэтому, несмотря на высокие значения теплоты образования этих соединений, все же кислороду, азоту, углероду термодинамически выгоднее располагаться в октаэдрических порах  $\alpha$ -Ti, искажая при этом кристаллическую решетку тем сильнее, чем больше разница между размером атома внедрения и поры. Кроме того, октаэдрические поры  $\alpha$ -Ti эластичные, легко растягиваются, и попавший атом внедрения

уже не может легко покинуть ее.

Поэтому, причиной развивающегося разрушения крупногабаритных изделий из титанового сплава, возможно, могут быть примеси внедрения.

Поскольку титан является активным элементом не только с газами, но и с элементами восстановления или легирования металла, локальное обогащение отдельных объемов образца легирующими элементами могло привести к образованию охруп-

чивающих интерметаллических включений, например, Ti<sub>3</sub>Al, TiAl, TiCr и других. Для выявления таких участков изучали распределение Al, Cr, Mo, Fe, Si, V в бракованном металле, результаты микрорентгеноспектрального зондирования образца приведены на рис. 2.

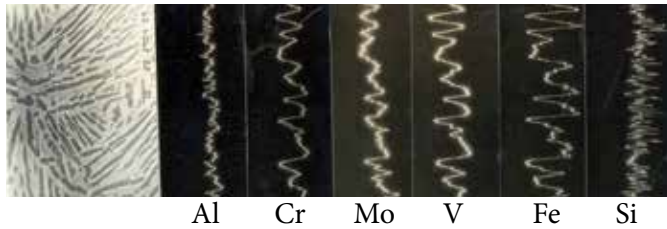


Рис. 2. Распределение легирующих элементов по зерну в двух колониях α + β-фаз образца сплав BT23, вырезанного из бракованного участка, x1000

Этим методом не обнаруживаются участки с микро неоднородностью, о чем свидетельствует отсутствие усиленных всплесков (сигналов). Тем не менее выявлена неоднородность распределения легирующих элементов: значительное обеднение α-фазы хромом, железом, молибденом соответственно в 6, 2 и 3 раза по сравнению со средней концентрацией этих элементов в сплаве, и обогащение алюминием в 1,1 раза (табл. 2).

Таблица 2. Микрорентгеноспектральное зондирование образцов сплава BT23

Место анализа	Содержание элементов, % масс.							
	Al	Cr	Mo	Fe	Si	V	Ti	Σ
В точке на границе зерна	6,902	0,015	0,370	0,027	0	3,060	89,626	100,0
α-фаза	6,785	0,163	0,690	0,245	0,060	3,980	88,140	100,0
β-фаза	4,579	1,567	2,638	1,146	0,080	7,400	82,590	100,0
Химический состав сплава	6,00	1,00	2,00	0,57	0,08	4,70	85,65	100,0

Как видно, β-фаза обогащена β-стабилизаторами соответственно в 1,6; 2; 1,3 раза и обеднена α-стабилизаторами – алюминием в 1,3 раза. Легирующие элементы перераспределились между фазами в процессе кристаллизации, деформации, термической обработки. Содержание легирующих элементов соответствовало пределам их растворимости в α- и β- фазах титана. Механические свойства этого сплава приведены в табл. 3.

Представленные механические свойства вполне удовлетворительны и не объясняют причин охрупчивания детали. Вместе с тем, обнаруженная неравномерность распределения легирующих элементов в пределах каждой из фаз и между фазами, а также недостатки структур, уменьшенное количество

Таблица 3. Механические свойства детали из сплава BT23, не выдержавшей специальных испытаний

Сплав	Механические свойства			
	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	Ψ, %	КСИ, МДж/м <sup>2</sup>
BT23 после термической обработки	1150	12,0	36,2	0,32
Металл после плавки	1150	8,4	39,5	0,32

α-фазы, ее неблагоприятная морфология (очень протяженные пластины чередуются с короткими грубыми выделениями по границам блоков) могли быть причинами нетривиального разрушения материала (рис. 3).

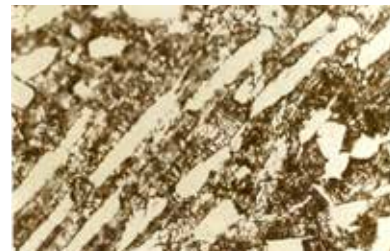


Рис. 3. Морфология распределения пластин α-фазы в бракованном изделии сплава BT23, x2000

Исследования показали, что существующие технологии выплавки титановых сплавов позволяют получать качественный металл. Чистые неметаллические включения в бракованном изделии не обнаружены. Возможно, разрушение изделия произошло из-за неравномерного перераспределения легирующих элементов. Поэтому при разработке метода контроля подобных включений, прежде всего, необходимо составить шкалу неметаллических включений – нитридов, карбидов, оксидов титановых сплавов.

**Библиографический список**

1. Лучинский И. В. Химия титана. – М.: Металлургия, 1076. – 380 с.
2. Плавка и литье титановых сплавов / А. М. Андреев, Н. Ф. Аношкин, Н. М. Борзцовская. – М.: Металлургия, 1965. – 368 с.
3. Металлургия титана / В. А. Гармата, В. С. Гуляницкий, В. Ю. Кремник. – М.: Металлургия, 1968. – 643 с.
4. Конфигурационная модель вещества / Г. В. Самсонов, И. Ф. Прядков, Л. Ф. Прядков. – К.: Наукова думка, 1971. – 319 с.
5. Shapovalova O. M. The production of hydrides in titanite powders under different ways of manufacturing / O.M. Shapovalova, E. P. Babenko. // Тезисы межд. конф. «Водородное материаловедение и химия гидридов металлов», ICHMS'2005– Sevastopol. – 236-237 p.

Поступила 11.03.2014