

УДК 669.295

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИТЕЙНОГО СПЛАВА ВТ20Л В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ

Марина Игоревна Зверева

Студентка 4 курса

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Н.И. Каменская

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Научный консультант: Н.А. Ночовная – доктор технических наук, начальник лаборатории титановых сплавов ГНЦ ФГУП «ВИАМ»

Ключевые слова: *примеси(impurity), горячее изостатическое прессование(hot isostatic pressing), пластичность(plasticity).*

Аннотация: *В данной работе проведены исследования влияния основных примесей – азота и кислорода на структуру, технологические и механические свойства титанового литейного сплава ВТ20Л до и после горячего изостатического прессования. Описаны механизмы действия данных примесей и установлено их оптимальное содержание, обеспечивающее повышение пластичности сплава при сохранении прочностных свойств на требуемом уровне.*

Введение

Титан и сплавы на его основе являются важным конструкционным материалом в тех отраслях техники, где выигрыш по массе играет доминирующую роль, в частности в ракетостроении и авиации. Однако стоимость производства титана и изготовления из него деталей достаточно высокая и в основном определяется низким значением коэффициента использования металла (0,05...0,15). Для широкого применения титановых сплавов необходимо снижать их стоимость. Одним из экономичных способов изготовления деталей из титановых сплавов является фасонное литье [1].

Метод фасонного литья позволяет изготавливать детали сложной конфигурации, при этом удается снизить трудоемкость изготовления деталей и повысить коэффициент использования металла до 0,3 и более.

При замене деформированного полуфабриката литыми заготовками необходимо обеспечить требуемый уровень и стабильность механических свойств деталей.

Прочностные свойства отливок из титановых сплавов ниже, чем деформированного металла, что связано с различиями их структуры и с микроскопической пористостью, присутствующей в отливках. Пористость удается ликвидировать горячим изостатическим прессованием (ГИП). Титановые отливки имеют высокую ударную вязкость, превосходящую ударную вязкость деформированного металла [2].

Для фасонного литья применяются литейные титановые сплавы марок ВТ1Л, ВТ5Л и ВТ20Л, предел прочности которых составляет 350...920 МПа. Благодаря высокой технологичности данные сплавы широко используются в авиации для изготовления высоконагруженных деталей ответственного назначения (литых корпусов двигателей, турбин, крыльчаток и т. д.). На рисунке 1 представлены фасонные отливки, применяемые в авиации [3].



Рис.1. Фасонные отливки из титанового сплава BT20L

На свойства титановых сплавов большое влияние оказывает содержание примесей газов, особенно азота и кислорода. Наибольший интерес представляет исследование влияния содержания примесей на свойства сплава BT20L, как наиболее прочного из перечисленных выше титановых сплавов.

Ограничения по содержанию кислорода и азота для литейного сплава BT20L, такие же, как и для деформированного сплава BT20 и составляют 0,15 % и 0,05 % соответственно. Механические свойства однотипных деталей из сплава BT20L могут существенно отличаться, так как нижний предел содержания примесей азота и кислорода для этого сплава не установлен.

Целью данной работы является определить нижний допустимый предел содержания примесей - азота и кислорода в литейном сплаве BT20L для обеспечения стабильных механических свойств и повышения пластичности при сохранении прочностных свойств на требуемом уровне.

С этой целью были проведены технологические и исследовательские работы по изучению влияния содержания указанных примесей на структуру, технологические и механические свойства литейного сплава BT20L.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили на слитках из литейного титанового сплава BT20L с различным содержанием примесей. Химический состав сплава BT20L согласно техническим условиям ТУ 1-92-184-91 «Сплавы титановые литейные. Марки» представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав BT20L (ТУ1-92-184-91)

Содержание основных элементов, %					Примеси, не более, %				
Ti	V	Mo	Al	Zr	C	Fe	Si	O	N
остальное	0,8-2,5	0,5-2,0	5,5-6,8	1,5-2,5	0,13	0,30	0,15	0,15	0,05

Исследования микроструктуры, твёрдости, механических и технологических свойств сплава BT20L были проведены для двух состояний металла:

- непосредственно после выплавки опытных слитков;
- после выплавки слитков с последующим ГИП.

Выплавку слитков проводили методом вакуумно-дуговой плавки с расходуемым электродом в печах типа ВД5М. При выплавке слитков использовали титан губчатый марки ТГ90. Для легирования использовали алюминий марки А99, лигатуру на основе молибдена марки АМТ-1, лигатуру на основе ванадия марки ВнАл-1, цирконий йодидный. Куски лигатуры измельчали до фракции менее 25 мм. Цирконий йодидный готовили в виде стружки на фрезерном станке. Алюминий предварительно отливали в кокиль в виде шаров диаметром 20 мм.

В лабораторных условиях разлив жидкого металла в формы для получения более мелких слитков осуществляли в гарнисажной печи ВДЛ-5.

Горячее изостатическое прессование проводили на установках ГИП QUINTUS 16 при температуре 970 °С и давлении 1300-1600 атм.

Исследование литейных свойств титановых сплавов (жидкотекучесть, линейная и объемная усадки) проводили в печи ВДЛ-5. Режимы плавки и заливки в формы для всех слитков были одинаковыми - сила тока 6000 А, напряжение 34 В.

Определение жидкотекучести проводили на спиральной пробе треугольного сечения высотой 15 мм, шириной 10 мм, с площадью поперечного сечения 75 мм. В верхней части пробы находится специальный металлоприемник, в который заливали всю порцию сливаемого металла. Форма изготовлена из прочного графита марки РВ. После заливки форму разбирали и измеряли длину залитой спирали.

Для определения линейной усадки отливали круглые стержни в специальную металлическую форму с диаметром заливного канала 20 мм и длиной 300 мм. После заливки измеряли длину залитой пробы и по формуле определяли величину линейной усадки:

$$\Upsilon_{\ell} = (l_m - l_o / l_m) \cdot 100$$

где: l_m – длина заливаемого канала модели, мм;
 l_o – длина залитой отливки после охлаждения, мм.

Величину объемной усадки определяли аналогичным методом, на шаровидных образцах, которые заливали в металлический кокиль. Диаметр заливаемой шаровой полости кокиля составляет 110 мм. После заливки и определения объема залитых образцов проводили расчет объемной усадки по формуле:

$$\Upsilon_o = (v_f - v_o / v_f) \cdot 100$$

где: v_f – внутренний объем формы (шар), мм³;
 v_o – объем залитой пробы, мм³.

Химический состав слитков из сплава ВТ20Л определяли спектральным методом на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 EXPLORER. Содержание примесей азота и кислорода определяли методом газового анализа на газоанализаторе ТС-600 по ГОСТ 17745-90.

Рентгеновский контроль производили по ПИ 1.2.226 на рентгеновских аппаратах РУМ-7, РАП 90И-5.

Микроструктуру исследовали на оптическом световом микроскопе «Olympus GX51» при увеличениях от 100 до 500 крат. Микрошлифы изготавливали по стандартной методике с использованием отрезного станка металлографического комплекса Struers Discotom 2, автоматического пресса для горячей запрессовки фирмы Struers ProntoPress 2 и шлифовально-полировального станка фирмы Struers Planapol 2.

Для выявления микроструктуры шлифы из сплава ВТ20Л, обезжиривали и травили в реактиве: 4 % HF + 10 % HNO₃ + 86% H₂O. Травление проводили при температуре 18...22 °С, время травления 10...60 с.

Измерение микротвердости проводили на микротвердомере Qness Q150 при нагрузке 200 гс.

Измерение твёрдости проводили на твердомере типа Роквелл по шкале HRC с нагрузкой 150 кг.

Механические испытания на растяжение проводили при комнатной температуре на цилиндрических образцах согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы исследований на растяжение».

Испытания на ударный изгиб проводили на копре РН300-CHV при комнатной температуре на образцах с концентратором напряжений «U» согласно ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

Результаты исследований и их обсуждение

Для исследования влияния примесей (азота и кислорода) на структуру и механические свойства сплава ВТ20Л было выплавлено 7 вариантов слитков с различным содержанием

примесей - азота и кислорода. Результаты спектрального и газового анализа слитков непосредственно после выплавки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав выплавленных слитков

№ плавки	Содержание элементов, %									
	Mo	V	Zr	Al	Fe	O	N	C	Si	Ti
1	1,63	1,76	2,02	6,15	0,05	0,063	0,005	0,03	0,02	остальное
2	1,98	1,53	2,38	5,77	0,07	0,075	0,006	0,03	0,01	остальное
3	1,74	1,64	2,33	5,69	0,06	0,085	0,009	0,02	0,03	остальное
4	1,81	1,42	2,42	5,84	0,05	0,090	0,010	0,04	0,02	остальное
5	1,96	1,78	2,31	5,92	0,05	0,100	0,016	0,03	0,02	остальное
6	1,69	1,55	2,16	5,97	0,07	0,130	0,021	0,02	0,01	остальное
7	1,72	1,48	2,40	6,03	0,06	0,147	0,048	0,03	0,02	остальное

Результаты спектрального анализа слитков показали, что их химический состав отвечает требованиям технических условий ТУ 1-92-184-91, предъявляемым к сплавам ВТ20Л.

Качество отливок сложной конфигурации зависит от технологических свойств сплава.

Результаты определения жидкотекучести, линейной и объемной усадки выплавленных слитков из сплава ВТ20Л показали, что все выплавленные слитки независимо от количества примесей имеют близкие значения жидкотекучести, линейной и объемной усадок.

Жидкотекучесть находится на уровне ~ 430 мм, т.е. достаточно высокая.

Линейная и объемная усадки имеют низкие значения - 1,05 % и 2,3 % соответственно, что позволяет изготавливать из сплава ВТ20Л детали с высокой точностью, необходимой для тонкостенных отливок.

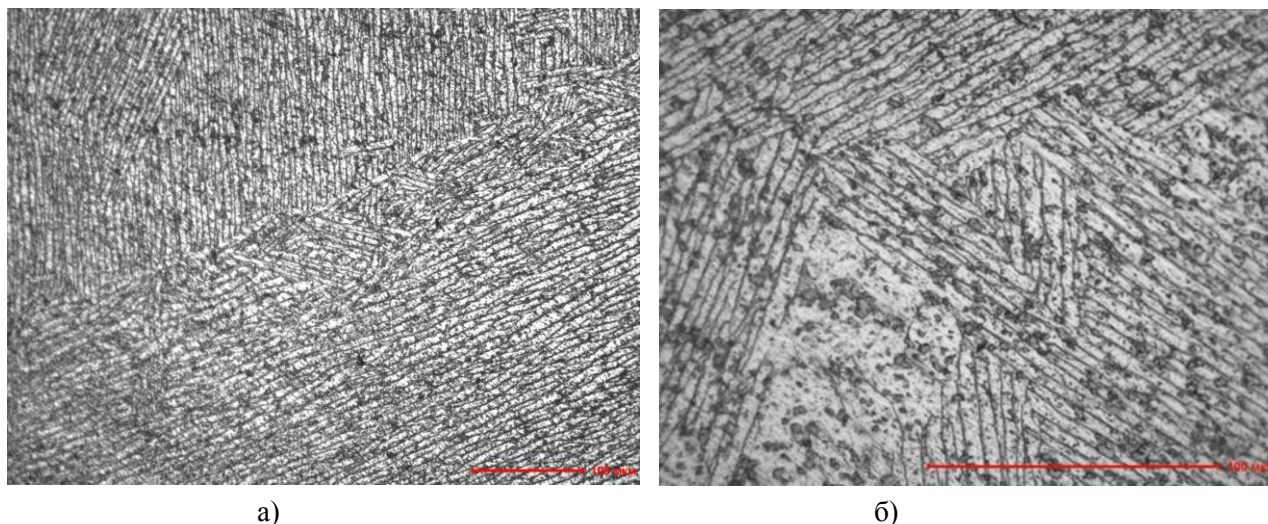
Для обнаружения внутренних дефектов (раковин, рыхлостей, пор) все слитки были подвергнуты рентгеновскому контролю непосредственно после выплавки и после ГИП. До ГИП выявлены дефекты – поры и рыхлости, но после проведения ГИП все выявленные внутренние дефекты отсутствуют.

Микроструктура слитков с различным содержанием кислорода и азота непосредственно после выплавки практически идентична.

Литейный сплав ВТ20Л относится к псевдо- α -сплавам. Это двухфазный сплав, состоящий из α -фазы - твёрдого раствора легирующих элементов и примесей в Ti_α с гексагональной плотноупакованной (ГП) решеткой и небольшого количества (до 2 %) β -фазы - твёрдого раствора легирующих элементов и примесей в Ti_β с объёмно центрированной (ОЦК) решёткой.

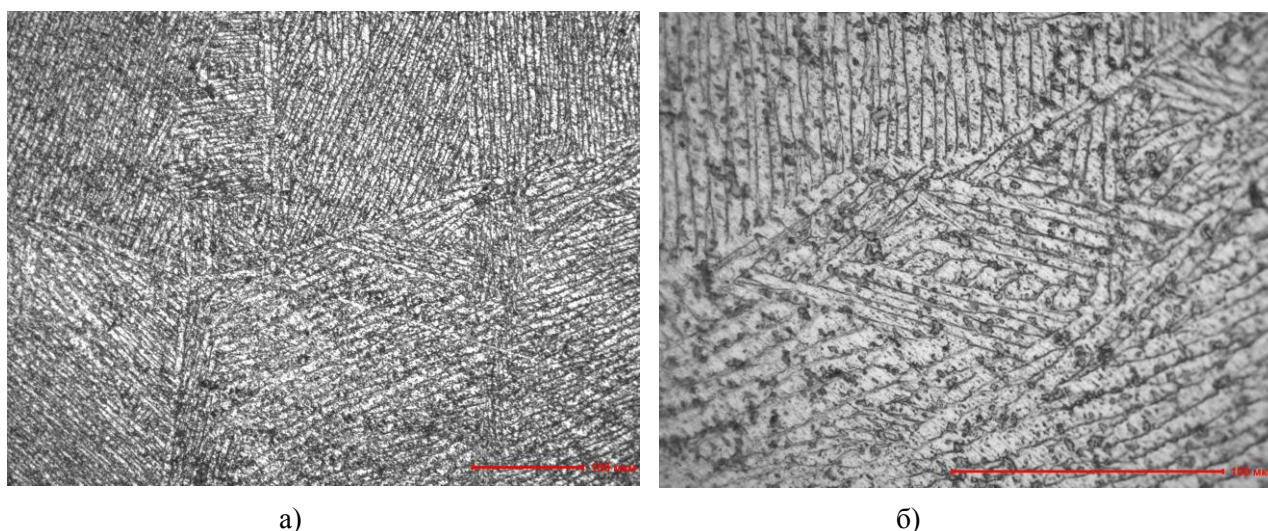
Микроструктура слитков типична для литой структуры и представляет собой полиэдрические зёрна превращенной β -фазы размером 200...400 мкм, внутри которых сформированы пластины α -фазы, ориентированные в различных направлениях. Пластинчатая структура формируется в процессе фазовой перекристаллизации при охлаждении.

Исследования показали, что количество примесей не оказывает влияния на микроструктуру слитков. Характерная микроструктура слитков сразу после выплавки с различным содержанием примесей приведена на рисунке 2.



а) б)
Рис. 2. Микроструктура слитков из сплава ВТ20Л непосредственно после выплавки:
а) $\times 200$; б) $\times 500$

Исследования также показали, что ГИП практически не влияет на микроструктуру. Характерная микроструктура слитков после ГИП приведена на рисунке 3.



а) б)
Рис. 3. Микроструктура слитков из сплава ВТ20Л после ГИП:
а) $\times 200$; б) $\times 500$

Результаты измерения микротвердости слитков из сплава ВТ20Л с различным суммарным содержанием примесей непосредственно после выплавки и после ГИП представлены на рисунке 4. Значения микротвердости были определены по результатам измерений в 5 точках на каждом шлифе, вырезанном из центральной части слитков. Микротвердость измеряли на участках пластин α -фазы.

Измерения микротвердости непосредственно после выплавки показали, что с увеличением содержания примесей - кислорода и азота микротвердость повышается с 261 по 292 HV.

ГИП повышает микротвердость по сравнению с литым состоянием.

Характер изменения микротвердости в зависимости от содержания примесей сохраняется и после ГИП. С увеличением количества примесей в слитках, прошедших ГИП микротвердость повышается с 286 до 302 HV.

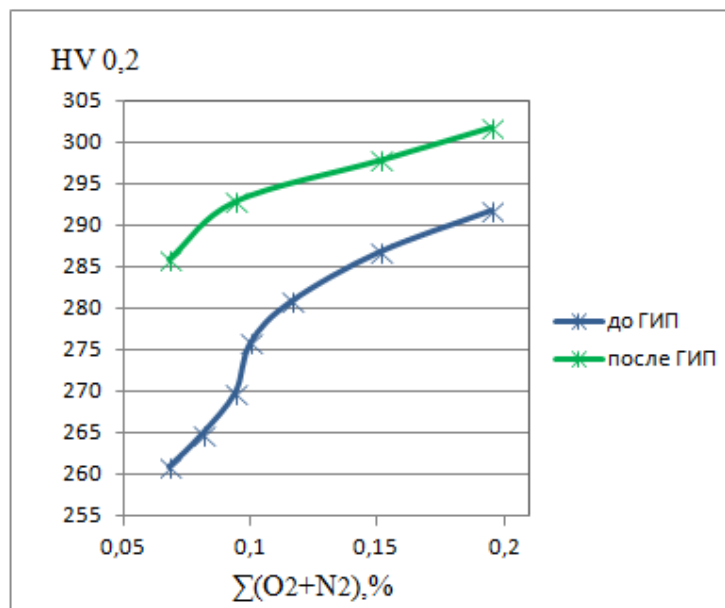


Рис. 4. Изменение микротвердости в зависимости от содержания примесей в сплаве ВТ20Л до и после ГИП

На рисунке 5 представлены результаты измерений твердости слитков. Значения твердости были определены по результатам измерений в 5 точках на каждом шлифе, вырезанном из центральной части слитков.

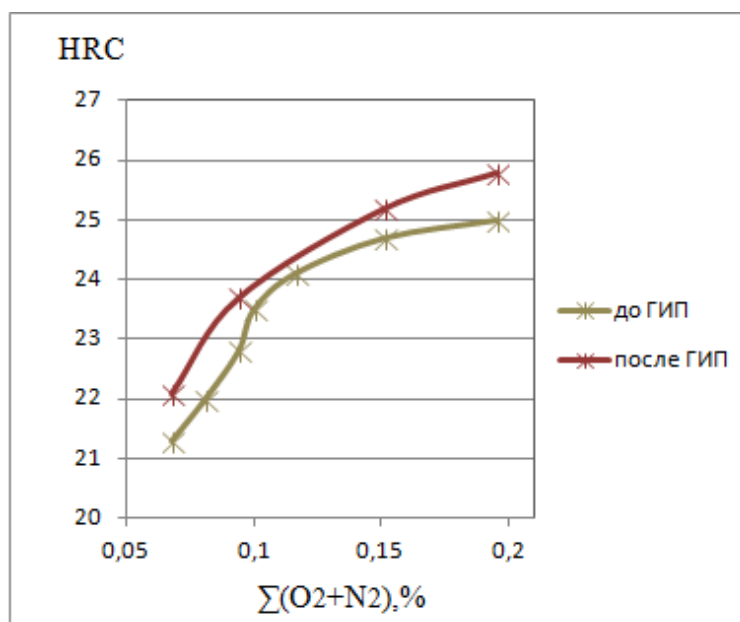


Рис. 5. Изменение твердости в зависимости от содержания примесей в сплаве ВТ20Л до и после ГИП

Твердость незначительно возрастает с увеличением содержания примесей с 21,3 до 25 HRC непосредственно после выплавки и с 22,1 до 25,8 HRC после ГИП.

Результаты испытаний на растяжение показали, что при увеличении суммарного содержания примесей (кислорода и азота) повышаются прочностные свойства - предел текучести и предел прочности (рис. 6) и снижаются пластические свойства - относительное удлинение и относительное сужение (рис. 7).

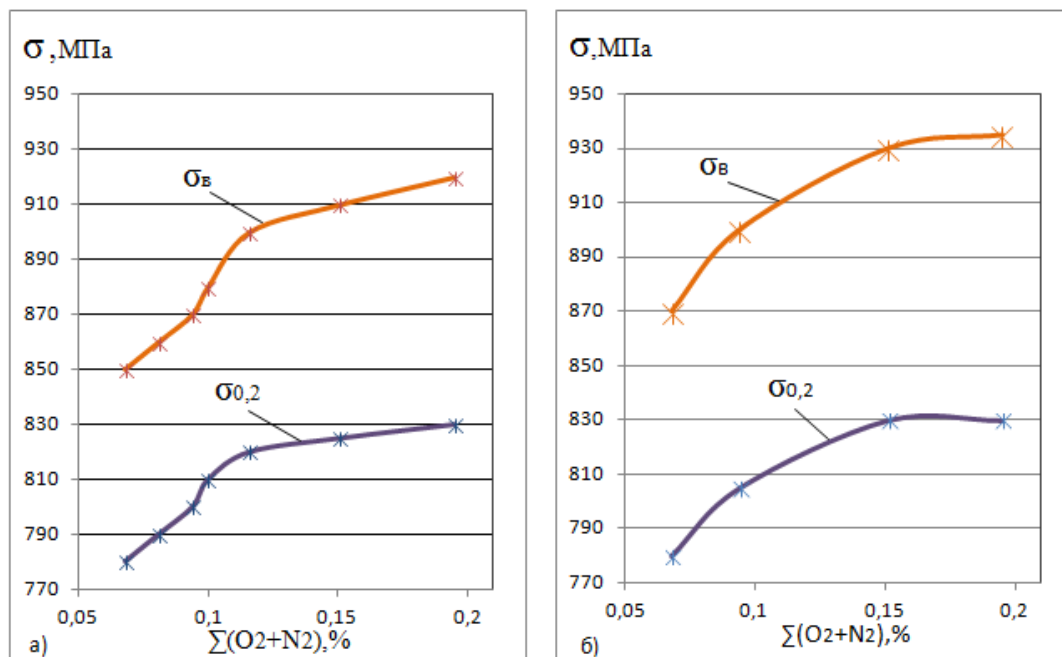


Рис. 6. Изменение предела прочности и предела текучести в зависимости от содержания примесей в слитках из сплава ВТ20Л: а) до ГИП; б) после ГИП

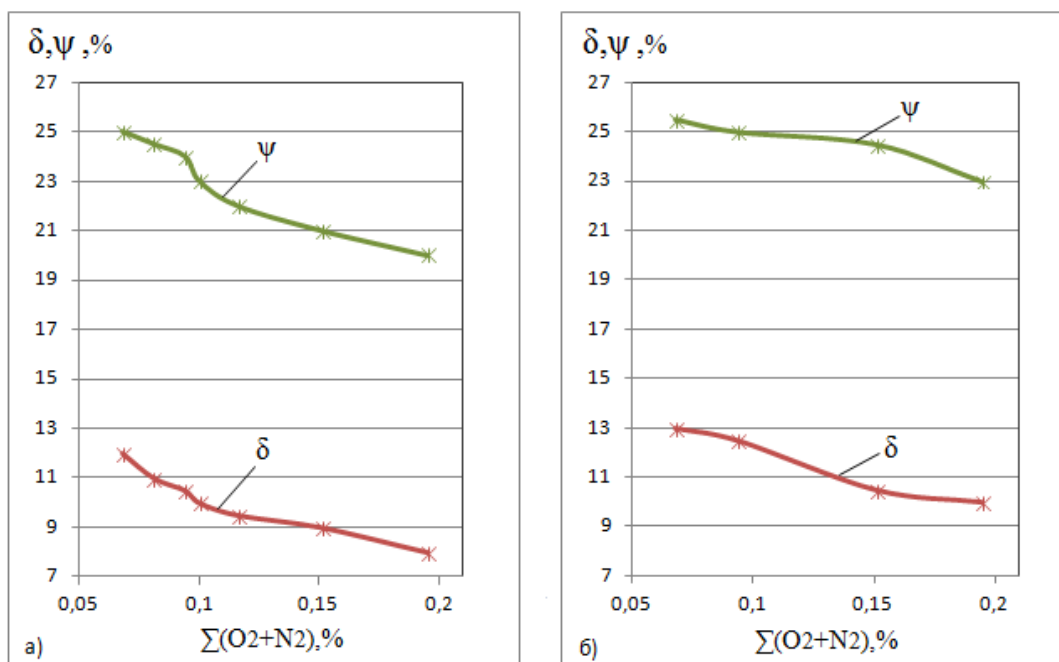


Рис. 7. Изменение относительного удлинения (δ) и относительного сужения (ψ) в зависимости от содержания примесей в слитках из сплава ВТ20Л: а) до ГИП; б) после ГИП

Из рисунков 6 - 7 видно, что с увеличением суммарного количества азота и кислорода до ГИП предел прочности и предел текучести возрастают с 850 до 915 МПа и с 780 до 830 МПа соответственно, но снижаются пластические свойства - относительное удлинение с 12 до 8 % и относительное сужение с 25 до 20%.

Такое влияние примесей на механические свойства связано с образованием твердых растворов внедрения азота и кислорода с титаном. Атомы кислорода и азота внедряются в

междоузлия кристаллической решетки титана, тем самым искажая ее. Снижение пластичности титанового сплава ВТ20Л происходит также из-за различного влияния на параметры кристаллической решетки a и c ГП решетки α -титана. При растворении кислорода и азота в титане параметр c сильно увеличивается, а параметр a возрастает очень незначительно. В итоге соотношение параметров c/a увеличивается и приближается к теоретическому значению 1,633, при котором титан теряет пластичность [4].

ГИП приводит к повышению предела прочности отливок на 20 МПа по сравнению с состоянием непосредственно после выплавки. Предел текучести после ГИП практически не изменяется.

ГИП приводит к увеличению пластических свойств: относительного удлинения на 1...2 % и относительного сужения на 0,5...3 %.

Результаты испытаний на ударный изгиб показали, что с увеличением суммарного содержания примесей (азота и кислорода) ударная вязкость снижается с 370 до 315 кДж/м² до ГИП и с 375 до 320 кДж/м² после ГИП (рис. 8).

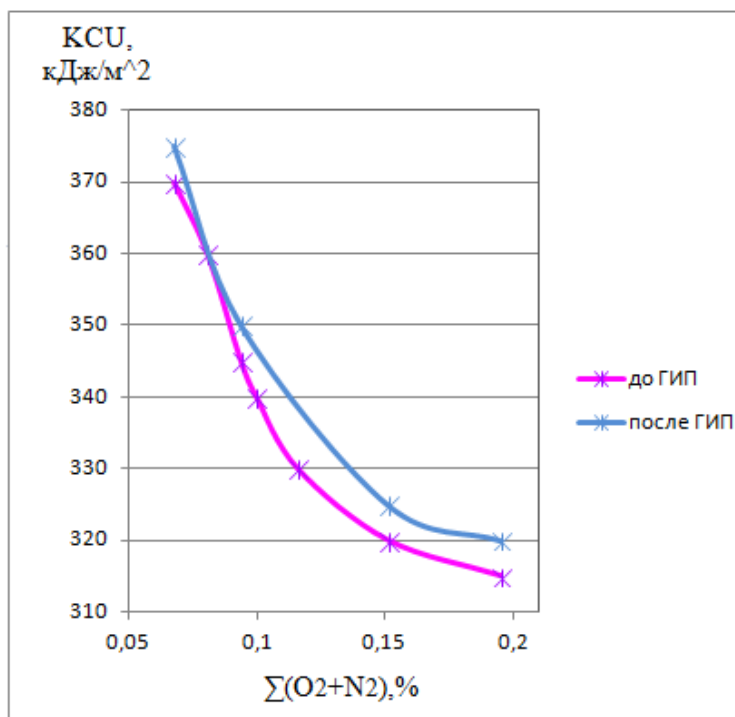


Рис. 8. Изменение ударной вязкости в зависимости от содержания примесей в слитках из сплава ВТ20Л

Таким образом, проведенные исследования показали, что ГИП слитков повышает прочностные механические свойства титанового сплава ВТ20Л. Поэтому для определения оптимального содержания примесей с целью повышения пластичности были использованы результаты исследований, полученные после ГИП.

На рисунке 9 заштрихован оптимальный диапазон содержания примесей, при котором происходит существенное повышение пластичности и сохраняется необходимый предел прочности. Как следует из рисунка 9, при суммарном содержании примесей в количестве 0,10 - 0,12 % относительное удлинение возрастает до 11,5...12,5 %. Предел прочности при этом составляет 905...915 МПа, что отвечает требованиям ($\sigma_b > 900$ МПа) ОСТ 1 90060-92 «Отливки фасонные из титановых сплавов. Технические требования».

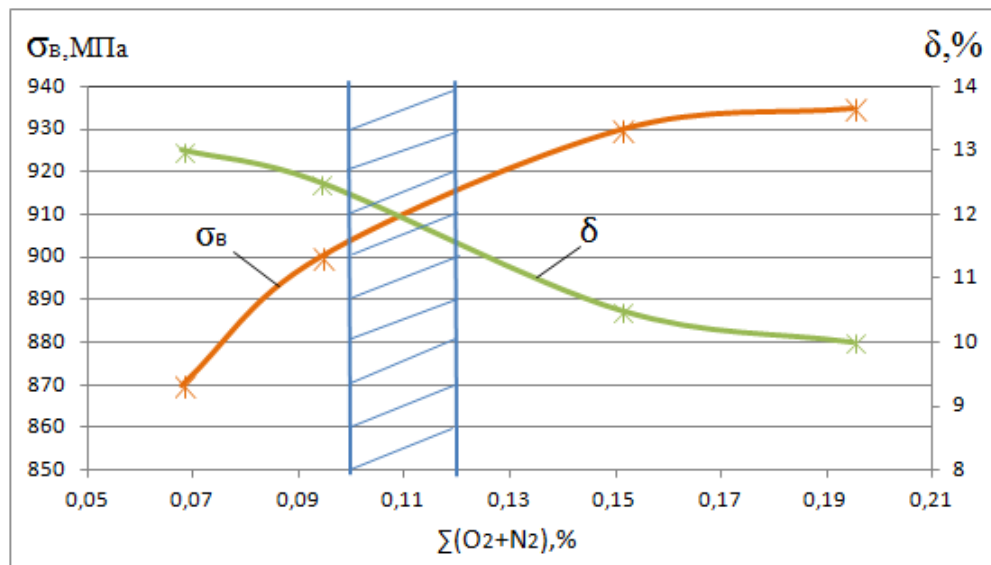


Рис. 9. Механические свойства сплава ВТ20Л после ГИП в зависимости от содержания примесей

При указанном содержании примесей повышается ударная вязкость до 345...355 кДж/м² и относительное сужение до 25...26 %. Дальнейшее снижение суммарного количества примесей, приведет к падению прочности, поэтому нижняя граница допустимого суммарного содержания примесей находится на уровне 0,10...0,12 % для обеспечения повышенной пластичности и стабильности механических свойств.

Выводы

1. Примеси - кислород и азот при их суммарном содержании 0,068...0,195 % не оказывают влияния на технологические свойства - жидкотекучесть, линейную и объемную усадку литейного титанового сплава ВТ20Л.

2. Примеси – кислород и азот при их суммарном содержании 0,068...0,195 % не оказывают влияния на структуру литейного титанового сплава ВТ20Л. Микроструктура выплавленных слитков представляет собой полиэдрические зёрна превращенной β -фазы размером 200...400 мкм, внутри которых сформированы пластины α -фазы, ориентированные в различных направлениях.

3. ГИП повышает сплошность, а также прочностные и пластические свойства слитков из сплава ВТ20Л по сравнению с состоянием после выплавки.

4. С увеличением суммарного количества примесей повышаются прочностные свойства - предел прочности, предел текучести и твердость, и снижаются пластические свойства - относительное удлинение и относительное сужение, а также ударная вязкость слитков из сплава ВТ20Л. Эта закономерность сохраняется для двух исследованных состояний металла: непосредственно после выплавки и после ГИП.

5. Установлено оптимальное суммарное содержание примесей кислорода и азота, равное 0,10...0,12 %, при котором происходит существенное повышение пластичности сплавов при сохранении предела прочности на требуемом уровне. Оптимальное суммарное содержание примесей справедливо для двух исследованных состояний металла: непосредственно после выплавки и после ГИП.

Литература

1. Бибииков Е. Л. [и др.]. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1983. – 296 с.

2. Братухин А.Г., Бибииков Е.Л., Глазунов С.Г. и др. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ВИЛС, 1998. – 292 с.
3. http://viam.ru/casting_titanium_alloys
4. Колачев Б.А, Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 544 с.