



УДК 669.187.526.002.2

ПОЛУЧЕНИЕ ТИТАНОВЫХ ТРУБ ИЗ ЗАГОТОВОК ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ

Т. Н. Буряк, В. С. Вахрушева, С. В. Ладохин, Т. В. Лапшук,
Н. И. Левицкий, В. И. Мирошниченко

Проведено детальное исследование качества трубных заготовок из промышленных отходов сплава ВТ1-0 (технически чистый титан), полученных методом плавки и литья в электронно-лучевой гарнисажной установке. Принципиальной особенностью плавки и рафинирования отходов является использование электромагнитного перемешивания расплава при электронно-лучевом обогреве. Установлено, что литые заготовки имеют благоприятную для пластической деформации мелкозернистую, равноосную и однородную макроструктуру при удовлетворительном уровне механических свойств. Выбраны способы горячей деформации литых трубных заготовок. Получены трубы с использованием горячей деформации способом прессования в α -области и поперечно-винтовой прокатки в β -области. Трубы из литых заготовок по качеству поверхности, структурным и механическим характеристикам не уступают стандартным аналогам, технология производства которых предусматривает ковку слитков и термообработку труб. Предложенная технология производства титановых труб может быть рекомендована для изготовления небольших партий изделий специального назначения.

A comprehensive investigation of the quality of tubular billets made from the industrial waste of VT1-0 alloy (commercial titanium) by melting and casting in the electron-beam skull installation was carried out. The use of electromagnetic stirring of melt during the electron-beam heating was a specific feature for melting and refining. It was stated, that cast billets had a fine-grained, equiaxial and homogeneous structure favorable for the plastic deformation at the satisfactory level of the mechanical properties. Methods of hot deformation of cast tubular billets were selected. Pipes were produced by hot deformation using the method of pressing in α -region and cross-helical rolling in β -region. Pipes made from cast billets are not inferior to the standard analogues as to the surface quality, structural and mechanical characteristics. The technology of their manufacture includes the forging of ingots and heat-treatment of pipes. The offered technology of production of titanium pipes can be recommended for manufacture of small batches of the special-purpose products.

Ключевые слова: титан; электронно-лучевая плавка; гарнисажный тигель; электромагнитное перемешивание; отходы; труба; структура; механические свойства

В настоящее время титановые трубы производят из слитков вакуумно-дугового переплава (ВДП), которые подвергают ковке с последующим изготовлением трубных заготовок путем пластической деформации [1]. Такая схема производства связана с заметными потерями металла при переделах и вероятностью его окисления вследствие взаимодействия с атмосферой воздуха.

Изготовление расходуемого электрода для ВДП из титановой губки представляет сложную техническую задачу. Одним из недостатков этой технологии является ограниченное количество отходов, которое можно вводить в шихту при переплаве

и последующем прессовании расходуемых электродов [2]. В процессе формирования слитка ВДП образуется грубая столбчатая кристаллическая структура, затрудняющая последующую пластическую деформацию металла.

Цель настоящей работы — проверить возможность изготовления титановых труб из литых заготовок, полученных в электронно-лучевой установке из отходов производства. Литейная технология получения заготовок отличается от традиционной тем, что, во-первых, позволяет использовать в шихте до 100 % отходов, а, во-вторых, как правило, характеризуется более высоким коэффициентом использования металла. В данном исследовании в качестве шихты были выбраны листовые отходы сплава ВТ1-0 (технически чистый титан).

© Т. Н. БУРЯК, В. С. ВАХРУШЕВА, С. В. ЛАДОХИН, Т. В. ЛАПШУК, Н. И. ЛЕВИЦКИЙ, В. И. МИРОШНИЧЕНКО, 2001



Экспериментальные плавки проводили в электронно-лучевой литейной установке, смонтированной на базе вакуумной индукционной печи ИСВ-004, технические характеристики которой следующие:

Объем плавильной камеры, м ³	2,2
Количество и тип электронно-лучевых пушек	Одна аксиальная
Параметры работы пушки:	
максимальная мощность, кВт	200
разгоняющее напряжение, кВ	26...30
Тип плавильно-заливочного тигля	Гарнисажный с системой ЭМП
Полезная емкость тигля, м ³	6·10 ⁻³
Параметры работы системы ЭМП тигля:	
напряжение, В	20...24
сила тока, А	800...1200
частота тока, Гц	50
Рабочее давление в плавильной камере, Па	0,13...1,3
Расход воды на охлаждение установки, м ³ /ч	10,4
Расход воды на охлаждение тигля, м ³ /ч	2,4
Время достижения рабочего давления в камере после разгерметизации установки, ч	0,5

В качестве плавильно-заливочного устройства использовали медный гарнисажный тигель, оснащенный комбинированной донно-боковой системой электромагнитного перемешивания (ЭМП). Схемы установки и тигля приведены соответственно на рис. 1 и 2. Особенности конструктивного исполнения и работы оборудования описаны в работе [3].

Заготовки получали методом литья в стационарные формы, представляющие собой стальные цилиндрические кокилы диаметром 110 мм и высотой 300 мм. Прибыльные надставки в экспериментах не применяли. Слив жидкого металла из тигля осуществляли путем его наклона.

Параметры плавки и заливки металла были следующими: масса завалки 19,6...20,5 кг, общее время плавки 34...36 мин, максимальная мощность электронно-лучевого нагрева 130...140 кВт, время выдержки расплава на максимальной мощности 14...16 мин, время заливки формы 5...6 с.

Выход на максимальную мощность электронно-лучевого нагрева проводили со ступенчатым повышением мощности, характерным для электронно-лучевой гарнисажной плавки [4]. Во всех случаях заливку расплава осуществляли в неподогреваемые формы. Всего было получено 5 заготовок. При выплавке заготовки № 2 в качестве шихты использовали заготовку, уже полученную по описанной технологии, т. е. практически был реализован двойной переплав с целью проверки влияния дополнительной тепловой обработки на свойства металла.

Качество титановых отливок исследовали на макротемплетах, отобранных с противоположных концов заготовок. На нетравленных темплетах были выявлены несплошности литого металла: преимущественно это раковины, максимальный размер которых достигал 3 мм, а также отдельные небольшие

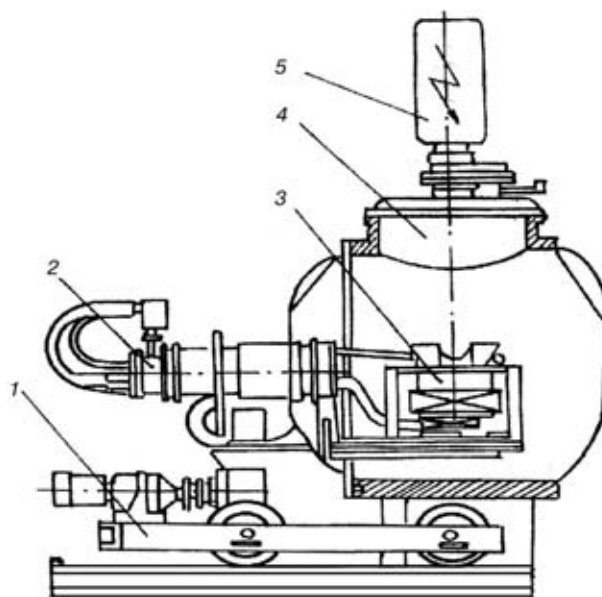


Рис. 1. Схема электронно-лучевой установки на базе печи ИСВ-004: 1 — станина; 2 — механизм наклона тигля; 3 — гарнисажный тигель; 4 — плавильная камера; 5 — электронно-лучевая пушка

трещины и поры. Указанные дефекты располагались по краям заготовок. В наибольшей степени они наблюдались в заготовках № 3 и 4. В других заготовках металл поражен такими дефектами незначительно. В центральной части заготовок имелись усадочные раковины диаметром до 7 мм. Глубина залегания усадочных дефектов составляла около 30 % высоты заготовки. Отмеченные поверхностные дефекты удалялись механической обработкой перед трубным переделом, а усадочные раковины — при сверлении заготовок под горячее прессование.

После травления в заготовках выявлена достаточно плотная, однородная равноосная макроструктура, более мелкозернистая в донной части по сравнению с прибыльной. В среднем размер зерна в донной части составил 2...3 мм, в прибыльной —

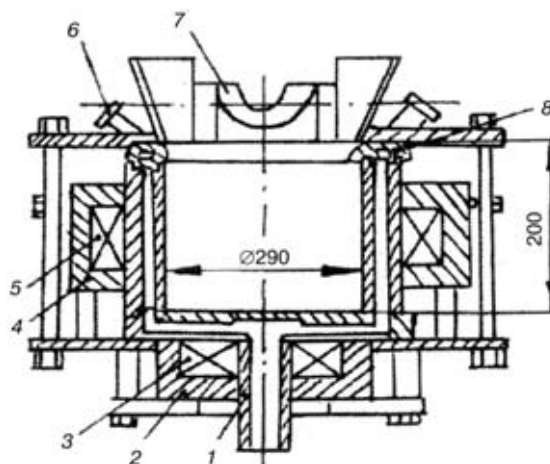


Рис. 2. Схема гарнисажного тигля с комбинированной донно-боковой системой электромагнитного перемешивания расплава: 1 — патрубок подвода охлаждающей воды; 2 — донный магнитопровод; 3 — донная катушка; 4 — боковой магнитопровод; 5 — боковая катушка; 6 — патрубок отвода охлаждающей воды; 7 — сливной носок; 8 — верхний фланец

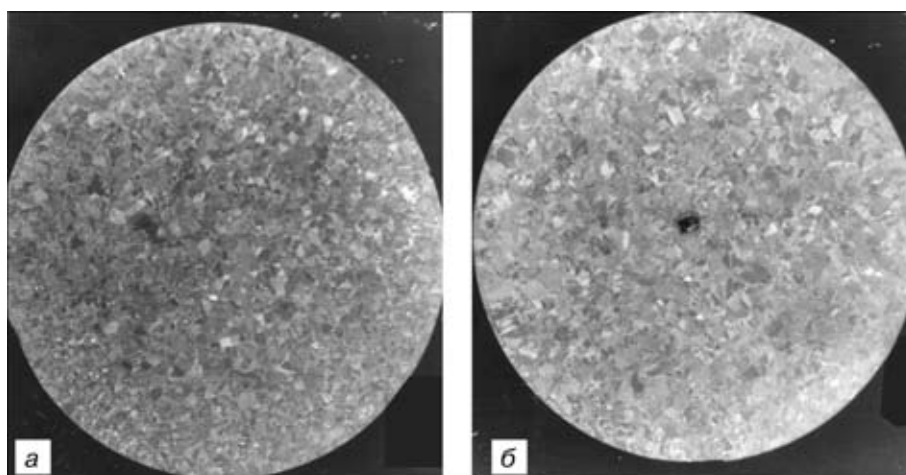


Рис. 3. Макроструктура донной (а) и прибыльной (б) частей заготовки № 2

3...5 мм. У заготовки № 2 по высоте наблюдалась наиболее равномерная макроструктура (рис. 3).

Микроструктуру изучали на образцах, отобранных из верхней (прибыльной) части заготовок. В целом у всех заготовок выявлена крупнозернистая микроструктура, имеющая пластинчатые внутризеренные образования, характерные для металла, который медленно охлаждается из β -области с последующим полиморфным $\beta \rightarrow \alpha$ -превращением. Наиболее крупное зерно наблюдалось у заготовки № 5, а наименьшее — у заготовки № 2. Микроструктура металла указанных заготовок приведена на рис. 4.

Данные о механических свойствах и твердости металла литых трубных заготовок представлены соответственно в табл. 1 и 2. Образцы для механических испытаний изготавливали из металла прибыльной части заготовок, а твердость определяли на макротемплетах, отобранных от обоих концов заготовок. Испытания на растяжение проводили на цилиндрических образцах в соответствии с ГОСТ 1497–84 при комнатной температуре и ГОСТ 9651–84 при повышенной температуре. Твердость контролировали в соответствии с ГОСТ 9013–59 по методу Роквелла (*HRB*) и ГОСТ 9012–59 по методу Бринеля (*HB*) на поперечных протравленных темплетах. Для сравнения в табл. 1 приведены также свойства металла кованой заготовки ВДП.

Максимальные значения прочности и твердости имеет металл заготовки № 2. Разницы в значениях

твердости по сечению литых заготовок не выявлено, что можно объяснить равномерностью макроструктуры. Следует отметить достаточно высокий уровень свойств металла при 150 °С.

Режим проведения электронно-лучевой плавки оказывает заметное влияние на структурообразование и свойства титана марки ВТ1-0, что подтверждается большей дисперсностью макро- и микроструктуры и большей их однородностью по высоте и сечению заготовки, а также более высокой прочностью металла заготовки № 2, полученной с применением двойного переплава. Ранее [5] влияние режима электронно-лучевого нагрева на свойства металла было установлено при гарнисажной плавке титановых сплавов ВТ20 и ВТ3-1 и циркониевого сплава Э110 (Zr–1 % Nb). Это указывает на необходимость строгой регламентации процесса электронно-лучевого переплава.

В целом полученные данные дают основание заключить, что металл литых заготовок имеет достаточный для последующей деформации ресурс пластичности и более стабильные значения прочности в сравнении с металлом кованой заготовки. Последнее объясняется нестабильностью процесса деформации при ковке, неравномерным охлаждением поверхности заготовки, наличием зон затрудненной деформации. При этом по длине и сечению кованой заготовки может формироваться неоднородная структура, что сказывается и на

Таблица 1. Механические свойства литых заготовок сплава ВТ1-0

№ плавки	Температура испытаний 20 °С				Температура испытаний 150 °С			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
1	477,8	389,6	16,4	35,4	316,05	268,5	17,8	48,4
2	500,8	417,0	10,6	37,1	413,1	364,6	16,9	39,8
3	439,5	372,4	10,2	39,0	366,5	314,6	14,0	39,0
4	415,0	363,1	15,0	35,7	327,8	282,7	15,0	49,5
5	419,5	357,2	13,6	50,7	312,2	248,4	13,2	45,0
ГОСТ 26492–82 для кованого металла	355...540	–	≥ 19	≥ 38	–	–	–	–



Таблица 2. Твердость сплава ВТ1-0 в литом состоянии

№ плавки	Верх заготовки		Низ заготовки	
	HB	HRB	HB	HRB
1	167,9	85,9	168,7	86,4
2	187,6	92,6	186,8	90,2
3	162,1	87,0	167,4	84,3
4	164,4	82,0	169,3	83,5
5	162,0	82,5	158,5	82,4

уровне механических свойств металла. Поэтому можно утверждать, что литая заготовка с регламентированной структурой имеет преимущества перед ковальной.

Полученные литые трубные заготовки были подвергнуты горячей деформации с изготовлением труб по двум технологическим схемам:

1. Прессование на горизонтальном трубопрофильном прессе усилием 16 МН. Условия проведения процесса: температура нагрева под прессование 850 °С, коэффициент вытяжки $\mu = 5,74$, величина деформации $\epsilon = 82,58\%$ ($\ln \epsilon = 1,75$).

2. Поперечно-винтовая прокатка на 2-валковом прошивочном стане А 30-70. Условия проведения процесса: температура нагрева под прокатку 1100 °С, коэффициент вытяжки $\mu = 1,96$, величина деформации $\epsilon = 48,98\%$ ($\ln \epsilon = 0,67$).

Выбор указанных схем обработки обусловлен следующими соображениями. Прессование является наиболее благоприятным способом горячей деформации, при котором за один проход удается заметно уменьшать диаметр и толщину стенки изделия [6]. Всестороннее сжатие и большие степени деформации позволяют максимально прорабатывать структуру заготовок. Важным фактором, влияющим на характер истечения титана при прессовании, является температура, определяющая фазовое состояние. При прессовании в области α - или $\alpha + \beta$ -фаз наблюдается более равномерный характер истечения, чем при прессовании в области β -фазы [7].

Способ горячей прокатки на косовалковых прошивных станах наиболее распространен при получении труб в отечественном производстве [6]. Он обеспечивает поперечную и продольную деформацию, а также кручение при относительно небольших степенях обжатия. Применение поперечно-винтовой прокатки целесообразно особенно на начальных стадиях трубного передела титана, имеющего исходную анизотропию свойств. После этой операции последующие обжатия могут быть значительно большими. При этом учитывается то обстоятельство, что титан, имеющий β -структуру, обладает большей способностью к пластической деформации.

Обычно деформация технического титана в высокотемпературной β -области приводит к появлению многокомпонентной текстуры рекристаллизации. После деформации титана при температу-

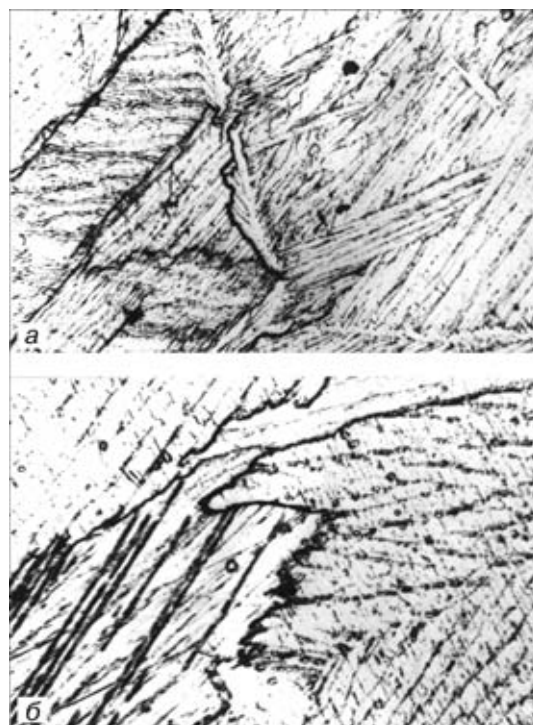


Рис. 4. Микроструктура (X100) заготовок сплава ВТ1-0 № 2 (а) и № 5 (б)

ре выше 1000 °С, как правило, двойники в структуре исчезают, а размер зерна становится тем большим, чем выше температура деформации, что свидетельствует о преобладании процессов динамической рекристаллизации [8].

По первой схеме деформации (прессование) из заготовок № 1, 2, 3 и 5 были получены трубы с наружным диаметром 47 мм и толщиной стенки 8 мм. Исследование этих труб показало, что они имеют ровную гладкую поверхность без трещин, расслоений и плен. Макроструктура во всех случаях плотная без дефектов несплошности металла, преимущественно равноосная у переднего конца труб и неравноосная — в хвостовой части. Макроструктура горячепрессованной трубы из заготовки № 3 показана на рис. 5.

Микроструктуру исследовали на образцах, отобранных от обоих концов труб, после электролитического травления шлифов в кислотном реактиве. На рис. 6 представлена микроструктура металла заготовки № 2 в поперечном сечении относительно направления деформации. Анализ микроструктуры показывает, что прессование при

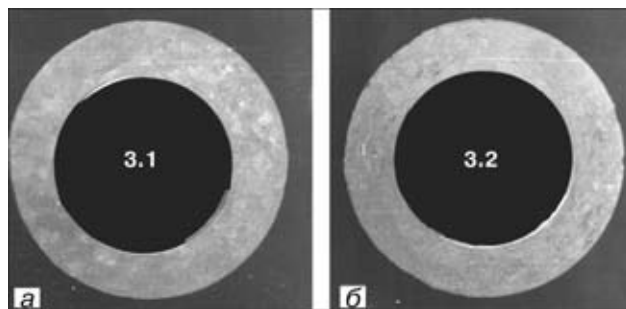


Рис. 5. Макроструктура переднего (а) и заднего (б) концов горячепрессованной трубы из заготовки № 3

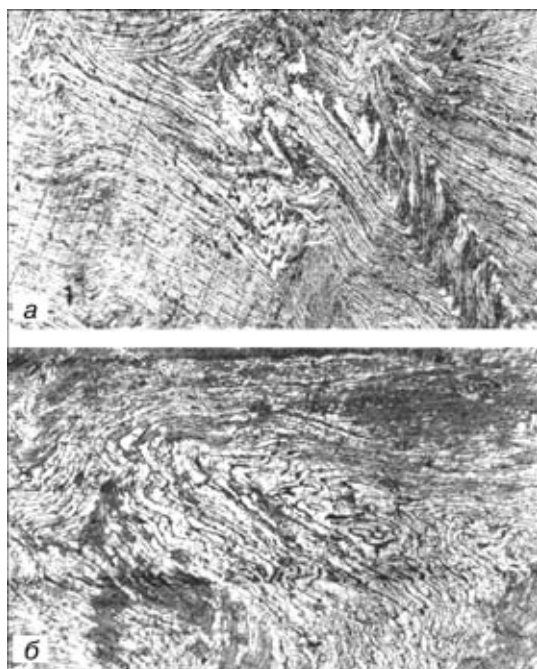


Рис. 6. Микроструктура (X100) переднего (а) и заднего (б) концов горячепрессованной трубы из заготовки № 2

температуре нагрева 850 °С и коэффициенте вытяжки $\mu = 5,74$ приводит к измельчению пластин α -фазы, которые вытягиваются в пределах α -колонии с образованием волокнистой структуры, имеющей внутризеренную субструктуру. Границы α -пластин в этом случае не являются препятствием для прохождения процессов рекристаллизации с образованием равноосных полиэдрических зерен, поскольку являются малоугловыми.

Механические свойства металла в продольном и поперечном направлениях, а также значения твердости приведены в табл. 3. В этой же таблице для сравнения представлены требования к свойствам стандартного металла горячедеформированных труб по ГОСТ 21945–76 после термообработки в продольном направлении. Видно, что металл горячепрессо-

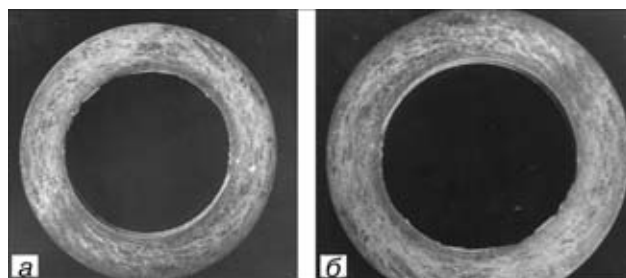


Рис. 7. Макроструктура переднего (а) и заднего (б) концов горячекатаной гильзы из титана ВТ1-0, полученной поперечно-винтовой прокаткой на прошивном стане

ванных труб, полученных из литых заготовок электронно-лучевой плавки, имеет высокие прочностные характеристики, при этом наблюдается анизотропия свойств, связанная, вероятно, с сохранением наклепа и наличием текстуры, формирующейся в α -фазе титана (ГПУ-решетка) при прессовании. Определяющую роль здесь играют процессы деформации, а не рекристаллизации.

Отметим, что в деформированных по описанному режиму трубах в зависимости от их назначения путем последующей термообработки можно получать микроструктуру различного типа: пластинчатую полиэдрическую структуру рекристаллизованной α -фазы в результате вакуумного отжига в α -области либо упрочненную мартенситную структуру α' -фазы в результате закалки в β -области.

По второй схеме заготовка № 4 была прокатана на трубу (гильзу) наружным диаметром 80 мм и толщиной стенки 12 мм. Для этой трубы также характерна ровная бездефектная поверхность. Макроструктура разных концов трубы (рис. 7) представляет собой ориентированные по направлению поперечно-винтовой (косой) прокатки зерна с наличием отдельных крупных образований, рост которых, вероятно, обусловлен длительной высокотемпературной выдержкой перед деформацией.

Микроструктура середины переднего и хвостового концов гильзы показана на рис. 8. По толщине

Таблица 3. Механические свойства и твердость сплава ВТ1-0 в горячепрессованных трубах

Металл	№ плавки	Температура испытаний 20 °С				Температура испытаний 150 °С				Твердость HRB при 20 °С	
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	передний конец	задний конец
Прессованная заготовка (температура нагрева 850 °С, $\mu = 5,7$)	1	<u>577</u> 568	<u>426</u> 436	<u>23,7</u> 10,1	<u>43,4</u> 37,0	418	305	29,3	45,0	86,0	87,2
	2	<u>640</u> 646	<u>584</u> 543	<u>18,7</u> 10,2	<u>39,8</u> 36,1	—	—	—	—	91,0	89,6
	3	<u>589</u> 593	<u>448</u> 497	<u>23,5</u> 11,3	<u>43,2</u> 46,9	423	318	24,0	52,1	87,3	89,1
	5	<u>571</u> 576	<u>420</u> 480	<u>26,3</u> 12,5	<u>48,1</u> 53,0	378	277	28,0	46,0	85,8	86,6
Горячекатаная труба после термообработки	Требования нормативных документов	343...568	≥ 245	≥ 20	≥ 42	—	—	—	—	—	—

Примечания. 1. Над чертой приведены свойства в продольном направлении, под чертой — в поперечном. 2. При температуре испытаний 150 °С указаны значения в продольном направлении.

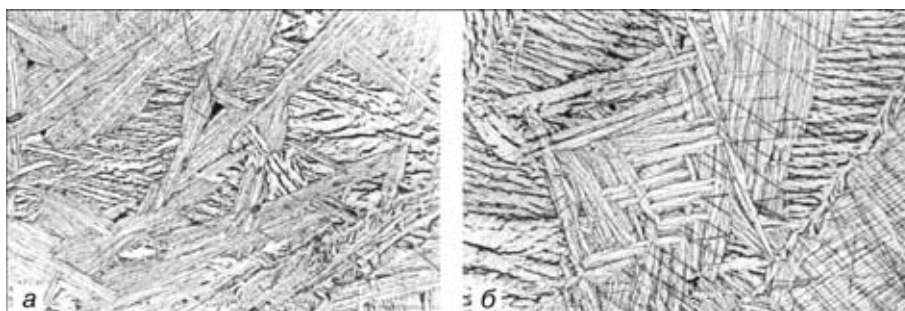


Рис. 8. Микроструктура ($\times 100$) переднего (а) и заднего (б) концов горячекатаной гильзы из титана ВТ1-0, полученной поперечно-винтовой прокаткой на прошивном стане

стенки она характеризуется высокой однородностью. Хвостовой конец имеет более мелкозернистую и однородную структуру, чем передний. Поперечно-винтовая прокатка в β -области при температуре нагрева $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и коэффициенте вытяжки $\mu = 1,96$ обеспечивает полное прохождение фазовой перекристаллизации с измельчением и образованием структуры пластичного типа в пакетах различной формы. В результате прокатки формируется вытянутое по спирали с небольшим углом наклона зерно β -фазы. Такая структура при последующей холодной деформации обеспечивает более благоприятную технологическую пластичность. Изучение твердости показало, что *HRB* переднего конца гильзы составляет 92,4, а заднего — 87,4, т. е. после прокатки твердость металла горячекатаной трубы повышается.

Выводы

1. Показана возможность получения из отходов титанового сплава ВТ1-0 трубных заготовок электронно-лучевой гарнисажной плавкой и литьем в стационарные металлические формы в вакууме. Заготовки имеют достаточно мелкозернистую, равноосную и однородную макроструктуру, а механические свойства литого металла отличаются стабильностью прочностных характеристик и удовлетворительной пластичностью, приемлемой для горячей деформации.

2. Из полученных заготовок прессованием и поперечно-винтовой прокаткой изготовлены трубы; выполнено комплексное исследование структуры и механических свойств горячедетформированного металла. Установлено, что титановые трубы, полученные из литых заготовок, по качеству поверхности, структурным и механическим характеристикам не уступают стандартным аналогам,

технология производства которых предусматривает ковку металла и термообработку труб.

3. Использование отходов титана для получения труб позволяет отказаться от приобретения слитков ВДП для этой цели, а исключение из технологического цикла производства титановых труб операцииковки позволяет заметно сократить безвозвратные потери металла, а также уменьшить затраты на передел, в том числе на энергоресурсы.

4. Предложенная технология производства титановых труб представляется особенно перспективной для получения небольших партий труб специального назначения.

1. *Титановые сплавы*. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар и др. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
2. *Титановые сплавы*. Плавка и литье титановых сплавов / А. Л. Андреев, Н. Ф. Аношкин, К. М. Борзцовская и др. — М.: Металлургия, 1978. — 384 с.
3. *Технологические особенности электронно-лучевой гарнисажной плавки титана* / С. В. Ладохин, В. Т. Яковлев, Н. И. Левицкий, А. В. Кошелап // *Процессы литья*. — 1998. — № 1. — С. 71–76.
4. *Ладохин С. В.* Пути совершенствования выплавки сплавов в электронно-лучевых литейных установках // *Литейное пр-во*. — 1985. — № 3. — С. 28–30.
5. *Ladokhin S.* Modern electron-beam technologies of multi-component Ni, Ti and Zr based alloys melting for casting production // 64th World Foundry Congress, Paris–France, September 11–14, 2000. — UA68.
6. *Металловедение и технология металлов* / Ю. П. Солдцев, В. А. Веселов, В. П. Демянцевич и др. — М.: Металлургия, 1988. — 512 с.
7. *Ермаков М. З., Соболев Ю. П., Гельман А. А.* Прессование титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1979. — 263 с.
8. *Ушков С. С., Копылов В. Н.* Научные аспекты выбора регламентированного структурно-текстурного состояния «морских» сплавов титана // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 1999. — № 9. — С. 38–44.

Физико-технологический ин-т металлов
и сплавов НАН Украины, Киев
Государственный трубный ин-т, Днепропетровск
Поступила 10.04.2001