



It is shown that annealing at 860 °C increases the size of elements of primary α -phase of alloy VT23, at 950 °C results in small increase of sizes of β -grains and α -fringe and partial changing of intragrain structure of alloy VT23.

В. Н. ФЕДУЛОВ, БНТУ

УДК 621.74

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА НА УРОВЕНЬ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОКОВОК ИЗ СПЛАВА ВТ23, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ $(\alpha+\beta)$ - И β -ОБЛАСТИ

В последние годы было принято считать, что повысить стабильность и уровень механических свойств и технологические характеристики $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов при упрочняющей термической обработке можно с помощью предварительной термической обработки. Отжиг, термоциклические обработки, другие виды термической обработки или их сочетание могут создать необходимое исходное состояние структуры. Большинство авторов склоняются в пользу проведения перед упрочняющей термической обработкой горячедеформированных полуфабрикатов отжига, что в известной степени отражено в действующих нормативно-технических документах.

В связи с этим исследовали процессы изменения структуры и свойств образцов поковок размерами $100 \times 200 \times 300$ мм, полученных ковкой с температуры 900, 950, 1050, 1150 и 1250 °C, в результате проведения отжигов при температурах 860, 950 и 1050 °C, время выдержки при температуре отжига 1 ч, охлаждение с печью до 450 °C (в целях достижения наиболее устойчивого состояния структуры сплава ВТ23 [1]), далее охлаждение на воздухе. Затем оценивали влияние изменений структуры на способность к последующему термическому упрочнению образцов этих поковок в сравнении с горячедеформированным состоянием. Предварительным проведением отжигов образцов одновременно добивались возможности выравнивания структуры и свойств по сечению поковок [2].

Температура отжига 860 °C – это температура $(\alpha+\beta)$ -области для сплава ВТ23 и она ниже температуры начала рекристаллизации (≈ 880 °C). Нагрев в течение 1 ч при этой температуре не приводит к существенному изменению формы и размеров β -зерен из-за стабилизирующего действия

α -фазы. Нагрев в двухфазной области [3] $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов связан с частичной реализацией $(\alpha+\beta) \rightarrow \beta$ -превращения, протекающего, как правило, путем диффузионного перемещения межфазной α/β -границы для крупных частиц α -фазы в сторону увеличения объема высокотемпературной β -фазы и растворения мелких частиц α -фазы и сопровождающегося перераспределением легирующих элементов между реагирующими фазами. Диффузионные процессы, как известно, кроме температуры, лимитируются также временем. Для сплава ВТ23 заметное изменение формы частиц α -фазы в β -превращенной структуре в результате нагрева при 850 °C происходило после выдержки в течение 3 ч и более. Поэтому заметного изменения внутризеренного строения для сплава ВТ23 у образцов поковок, охлажденных послековки на воздухе и отожженных при 860 °C (1 ч), при исследовании микроструктуры не было обнаружено. Электронно-микроскопические исследования показали, что в морфологии α -пластин в результате отжига при температуре 860 °C произошли как в наружных слоях, так и в середине следующие изменения: пластины α -фазы частично глобуляризовались, отсутствовали двойники в теле пластин, стала более ярко выражаться межфазная α/β -прослойка. В процессе охлаждения с печью до 450 °C с температуры отжига 860 °C распад высокотемпературной β -фазы осуществлялся путем движения α/β -границы в сторону небольшого увеличения размеров первичных α -пластин и расстояния между ними по сравнению с исходной структурой. По всей видимости, состав вновь образующейся при охлаждении α -фазы отличался от состава уже существовавшей при температуре отжига первичной α -фазы и травимость их оказалась различной, что создало впечатление наличия

Т а б л и ц а 1. Механические свойства образцов поковок из сплава ВТ23 после отжига по различным режимам

Номер режима	Режим деформации и охлаждения	Температура отжига, °С	Значения механических свойств (наиболее характерные)											
			σ _в , МПа		δ, %		ψ, %		КСУ, МДж/м ²		КСТ, МДж/м ²			
			наружный слой	середина	наружный слой	середина	наружный слой	середина	наружный слой	середина	наружный слой	середина		
1	900–820 °С, охлаждение на воздухе	860	1018	1010	12–16	12–16	36	37–39	0,54	0,55	0,27	0,29		
		950	995	995	16	20	34–39	37–39	0,64	0,71	0,28	0,33		
		1050	1075	1075	8–12	8–12	25	24–25	0,29	0,25	0,17	0,18		
2	900–820 °С, охлаждение в воде	860	1050	1010	12–16	12–20	33–35	39–44	0,39	0,52	0,13	0,21		
		950	1000	1005	12	12–16	36	38–41	0,50	0,64	0,29	0,33		
		1050	1080	1070	8–12	8–12	24–25	24–28	0,23	0,29	0,15	0,16		
3	950–860 °С, охлаждение на воздухе	860	1045	1020	10–12	12	31–42	44–49	0,69	0,67	0,35	0,38		
		950	1020	1020	8–10	10	27–28	24–26	0,45	0,43	0,24	0,22		
		1050	1055	1040	8	8	19–21	23–25	0,35	0,36	0,18	0,19		
4	1050–880 °С, охлаждение на воздухе	860	1030	1015	12–14	14–18	30	29–33	0,49	0,54	0,21	0,26		
		950	1020	1015	12–14	14–16	36	41	0,40	0,64	0,24	0,37		
		1050	1075	1075	8	6–10	16–18	13–23	0,21	0,31	0,15	0,11		
5	1150–900 °С, охлаждение на воздухе	860	1030	1005	12–14	14–18	28–44	43–48	0,42	0,51	0,18	0,23		
		950	1000	980	12–16	18	38–44	44	0,52	0,64	0,32	0,36		
		1050	1045	1040	10	8–10	23–28	18–22	0,34	0,33	0,18	0,17		
6	1150–900 °С, охлаждение в воде	860	1030	1010	12–18	16	47	54	0,59	0,56	0,34	0,32		
		950	970	970	16	16–18	45	54	0,59	0,70	0,35	0,40		
		1050	1040	1035	10	10	30	25	0,30	0,30	0,16	0,17		
7	1150–900 °С, охлаждение на воздухе 5 мин – вода	860	1020	1010	12–16	12–16	40	39	0,57	0,74	0,30	0,37		
		950	980	975	12	12	24–34	30–41	0,77	0,80	0,40	0,45		
		1050	1085	1050	8	8–10	14	15–18	0,30	0,37	0,15	0,19		
8	1250–960 °С, охлаждение на воздухе	860	1005	985	12	14–16	26–35	35–42	0,50	0,60	0,23	0,28		
		950	1070	1050	8	8–12	25	25–27	0,31	0,40	0,13	0,18		
		1050	1040	1030	8	8	23–26	20–27	0,25	0,26	0,11	0,12		

выраженной межфазной α/β -прослойки. В β -фазе после отжига наблюдали полосы, которые, по-видимому, также связаны с ее расслоением по химическому составу. Следует еще раз отметить, что в целом внутризеренная структура сплава ВТ23 после отжига при 860 °С образцов поковок мало отличалась от состояния после деформации и охлаждения на воздухе, хотя фазовый состав сплава и состав α - и β -фаз, судя по изменению размеров параметров их решетки, стали более близкими к равновесному состоянию сплава.

В общем случае для поковок, охлажденных после деформации на воздухе, отжиг при температуре 860 °С из-за растворения мелких частиц α -фазы и снижения дефектности структуры способствовали по сравнению с горячедеформированным состоянием снижению прочности примерно на 80–100 МПа, повышению характеристик пластичности примерно в 1,5–2,0 раза, ударной вязкости и трещиностойкости примерно в 1,5 раза (табл. 1, режимы 1, 3, 4, 5, 8). Наиболее однородные значения механических свойств по сечению после отжига при 860 °С наблюдали у поковок, деформированных с температуры 900 и 1150 °С.

Для поковок, ускоренно охлажденных после деформации с 1150 °С (вода или воздух–вода), в результате отжига при температуре 860 °С механические свойства наружных слоев и середины отличались между собой незначительно (табл. 1, режимы 6, 7), а структура сплава в них после отжига мало отличалась от поковки, охлажденной на воздухе. Для поковки, деформированной с 900 °С и охлажденной в воде, из-за наличия более мелкого β -превращенного зерна и тонких α -пластин в наружных слоях, свойства отличались несколько большей прочностью по сравнению с наружными слоями поковки, охлажденной на воздухе (табл. 1, режим 2).

Исследовали влияние предварительного отжига при температуре 860 °С на способность к термическому упрочнению: нагрев при 760 °С в течение 30 мин, вода + старение: 450 °С, 8 ч, воздух, образцов размерами 11 × 11 × 60 мм, вырезанных из наружных слоев и середины поковки, и сравнивали с упрочнением таких же образцов горячедеформированного сплава ВТ23. В результате проведенных исследований следует остановиться на следующих основных моментах. Во-первых, предварительный отжиг образцов при температуре 860 °С способствовал в результате последующего термического упрочнения небольшому снижению прочности до $\sigma_B = 1300$ – 1325 МПа в наружных слоях и до $\sigma_B = 1280$ – 1295 МПа в середине для поковок, деформированных по режимам 1, 2, 3, 4, 5,

6, т. е. снижение прочности в общем случае составило примерно 25–35 МПа по сравнению с термическим упрочнением по одному и тому же режиму горячедеформированного сплава ВТ23 (табл. 2, режимы 1, 2, 3, 4, 5, 6). При этом из-за небольшого увеличения толщины α -оторочки и α -пластин за счет растворения при отжиге наиболее мелких частиц первичной α -фазы, вызвавшего одновременно со снижением дефектности структуры по сравнению с горячедеформированным состоянием сплава ВТ23 небольшое снижение прочности образцов в результате термического упрочнения также наблюдали небольшое изменение характеристик пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости. Для всех поковок незначительное увеличение толщины пластин первичной α -фазы в результате отжига при 860 °С при термическом упрочнении по сравнению с горячедеформированным состоянием сплава способствовало небольшому увеличению ударной вязкости (КСУ): примерно на 0,01–0,05 МДж/м², причем наиболее значительное увеличение отмечено для случаев охлаждения поковок после деформации в воде – 0,03–0,05 МДж/м², а также трещиностойкости (КСТ) примерно на 0,01–0,02 МДж/м² (табл. 2). Для поковок, деформированных с температуры 900 °С, проведение предварительного отжига при 860 °С не вызвало изменения значений характеристик пластичности: $\delta = 6$ –8%, $\psi = 8$ –10% (табл. 2, режимы 1, 2), в то время как для поковок, деформированных с температуры 950, 1050 и 1150 °С, увеличение толщины α -оторочки во время отжига способствовало снижению значений δ до 4% (табл. 2, режимы 3, 4, 5, 6). Исключение здесь составила средняя зона поковки, деформированной с 1150 °С и охлажденной затем в воде: значения δ остались на уровне 6–8%, так как α -оторочка здесь была тоньше, а β -зерна по размерам меньше, чем после охлаждения поковки на воздухе. Проведение предварительного отжига при 860 °С для поковок, деформированных по режимам 3, 4, 5, 6, не оказало существенного влияния на значения ψ при последующем термическом упрочнении по сравнению с горячедеформированным состоянием сплава, так как внутризеренное строение было практически тем же. Исключение опять же составила середина поковки с режимом деформации 6, где увеличение толщины α -пластин способствовало повышению значений ψ до 23% вместо 11–15% (табл. 2, режимы 3, 4, 5, 6).

Для поковки, деформированной с 1250 °С и охлажденной на воздухе, проведение предварительного отжига при 860 °С перед термическим упрочнением по сравнению с упрочнением

Т а б л и ц а 2. Механические свойства образцов сплава ВТ23, вырезанных из зон поковки и упрочненных в равных условиях

Номер режима	Режим деформации и охлаждения	Температура отжига, °С	Значения механических свойств (наиболее характерные)											
			σ _в , МПа		δ, %		ψ, %		КСУ, МДж/м ²		КСТ, МДж/м ²			
			наружный слой	сердцевина	наружный слой	сердцевина	наружный слой	сердцевина	наружный слой	сердцевина	наружный слой	сердцевина		
1	900–820 °С, охлаждение на воздухе	860	1325	1295	6	7	8–10	8–10	0,20	0,21	0,06	0,06		
			1285	1270	4–5	4–5	8–9	8–10	0,18	0,17	0,05	0,05		
			1280	1250	4	4	6–8	8	0,15	0,15	0,03	0,03		
2	900–820 °С, охлаждение в воде	без отжига	1335	1315	6	6	8–11	9–11	0,19	0,19	0,05	0,05		
			1325	1285	6	6	8–10	8–10	0,20	0,21	0,06	0,06		
			1300	1280	4	4	8–9	8	0,17	0,18	0,05	0,05		
3	950–860 °С, охлаждение на воздухе	1050	1280	1250	4	4	7–8	7–8	0,15	0,16	0,03	0,03		
			1345	1320	5–6	6	8–9	9–10	0,17	0,19	0,05	0,05		
			1320	1290	6	6	14	18	0,26	0,29	0,10	0,12		
4	1050–880 °С, охлаждение на воздухе	950	1285	1255	4	4	11	15	0,22	0,25	0,10	0,12		
			1280	1250	2	4	8–11	8–11	0,21	0,21	0,07	0,07		
			1345	1300	6	6	11–13	11–15	0,25	0,27	0,09	0,11		
5	1150–900 °С, охлаждение на воздухе	1050	1310	1290	6	6	13	13	0,27	0,28	0,11	0,13		
			1300	1270	4	4	12	13	0,24	0,26	0,12	0,15		
			1245	1215	4	4	10	12	0,16	0,18	0,10	0,10		
6	1150–900 °С, охлаждение в воде	без отжига	1340	1305	6	6	13	15	0,25	0,27	0,12	0,13		
			1310	1285	6	6	12	13	0,28	0,34	0,17	0,18		
			1305	1275	4	4	11	13	0,25	0,27	0,13	0,15		
7	1150–900 °С, охлаждение на воздухе 5 мин – вода	1050	1250	1180	4	4	11	11	0,20	0,25	0,07	0,09		
			1335	1320	6	6	14	17	0,29	0,31	0,15	0,17		
			1320	1290	6	6	10	23	0,23	0,25	0,08	0,09		
8	1250–960 °С, охлаждение на воздухе	950	1290	1260	6–8	6–8	14	16	0,26	0,32	0,10	0,12		
			1240	1180	2	2	6	8	0,20	0,22	0,06	0,07		
			1335	1315	5	6	13	15	0,25	0,27	0,10	0,11		
9	1150–900 °С, охлаждение на воздухе 5 мин – вода	1050	1320	1295	5	6	12	18	0,23	0,26	0,08	0,09		
			1285	1275	6	6	14	16	0,25	0,30	0,10	0,11		
			1250	1210	2	2	7	10	0,21	0,23	0,07	0,08		
10	1250–960 °С, охлаждение на воздухе	1050	1340	1305	4	6	11	13	0,18	0,20	0,07	0,08		
			1270	1245	4	4	13	11	0,28	0,30	0,14	0,16		
			1260	1240	2	2	11	11	0,24	0,25	0,07	0,08		
11	1250–960 °С, охлаждение на воздухе	1050	1235	1180	2	2	9	9	0,15	0,15	0,03	0,04		
			1290	1270	4	4	10	11	0,27	0,26	0,09	0,08		
			1290	1270	4	4	10	11	0,27	0,26	0,09	0,08		

горячедеформированного сплава ВТ23 вызвало снижение прочности до $\sigma_B = 1245\text{--}1275$ МПа (на 20–30 МПа), повышение значений ударной вязкости (КСУ) до 0,28–0,30 МДж/м² (на 0,02–0,04 МДж/м²), трещиностойкости КСТ = 0,14–0,16 МДж/м² (на 0,02 МДж/м²) и не оказало заметного влияния на характеристики пластичности: $\delta = 4\%$, $\psi = 11,5\text{--}12,5\%$ (табл. 2, режим 8).

Предварительный отжиг при температуре 950 °С в течение 1 ч (β -область; на 30 °С выше $t_{\text{п. п.}}$) ускоряет процесс рекристаллизации и выравнивая по сечению параметров структуры и свойств сплава ВТ23 для всех поковок за исключением одной, когда деформацию осуществляли в интервале температур 1250–960 °С. Проведение предварительного отжига при этой температуре приводит к изменению формы β -зерен, приближая ее к более правильному виду. При этом размер зерен увеличивается до значений $D = 600\text{--}800$ мкм за исключением поковки, деформацию которой проводили при температуре 1150–900 °С с последующим охлаждением в воде: здесь размер β -зерен $D = 300\text{--}500$ мкм, а также поковки, деформацию которой осуществляли в интервале температур 1250–960 °С, где размер β -зерен сплава оставался таким же, как и после деформации. Для остальных случаевковки размеры β -зерен сплава ВТ23 после отжига при 950 °С практически не зависели от температуры предшествующей деформации. Значительные изменения претерпело в результате проведенного отжига внутризеренное строение сплава ВТ23: оно стало типичным для структуры «корзинчатого плетения» для всех поковок. Морфология пластин α -фазы во всех случаях характеризуется после отжига большой степенью неоднородности: в основном это пластины толщиной до 2 мкм, рядом с которыми присутствуют и более тонкие – до 0,5–1,0 мкм. Пластины α -фазы в основном фрагментированы: наблюдаются двойники и дислокационные стенки. Возникновение повышенной плотности дефектов после отжига в α -фазе, по-видимому, является следствием релаксации межфазных напряжений, возникающих в процессе $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ -превращения, так как предел текучести α -фазы в температурном интервале прохождения релаксационных процессов ниже по значению, чем в β -фазе [3]. Границы бывших β -зерен оторочены α -фазой. Толщина α -оторочки составляет 3–4 мкм. Отличие в размерах первичной α -фазы объясняется тем, что ее выделение при охлаждении в первую очередь происходило по границам β -зерен, а затем уже образовывались новые пластины; те же пластины, которые выделялись на более раннем этапе, имели также большую толщину.

В целом проведение предварительного отжига при температуре 950 °С (выдержка 1 ч, охлаждение с печью до 450 °С, далее на воздухе) таким образом способствовало небольшому повышению однородности структуры и механических свойств. При этом прочностные характеристики сплава ВТ23 для поковок, деформация которых осуществлялась с температур 900–1150 °С, понизились по сравнению с отжигом при 860 °С, а показатели пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости либо остались на том же, что и после отжига при 860 °С, уровне (δ , ψ), либо несколько повысились: КСУ, КСТ (табл. 1, режимы 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7). Это следует, по-видимому, связывать с увеличением размеров и более правильной формой β -зерен, а также изменением внутризеренного строения сплава ВТ23 по сравнению с исходной структурой. Наиболее устойчивыми к отжигу при 950 °С оказались структуры сплава ВТ23 у поковок, которые получали ковкой с 950 и 1050 °С (табл. 1, режимы 3, 4), так как они в исходном состоянии имели структуру, близкую к структуре «корзинчатого плетения». Отжиг при температуре 950 °С для поковки, деформированной в интервале температур 1250–960 °С, изменил только внутризеренную структуру без изменения размеров β -приращенных зерен: уменьшились размеры α -пластин (≈ 2 мкм), увеличилась толщина α -оторочки до 3–4 мкм, что привело к повышению прочности и трещиностойкости сплава по сравнению с отжигом при 860 °С (табл. 1, режим 8).

Как уже отмечалось выше, проведение отжига образцов поковок при 950 °С для случаевковки с 900–1150 °С вызвало увеличение размеров β -превращенных зерен сплава ВТ23 до значений $D = 600\text{--}800$ мкм по сравнению с состоянием после деформации. Исключение составили случай деформации поковки с температуры 1250 °С и последующим охлаждением на воздухе, где размер β -зерен сплава остался после отжига тот же, что и после деформации, а также случай деформации поковки с температуры 1150 °С и охлаждением в воде, где $D = 300\text{--}500$ мкм. Проведение отжига при 950 °С способствовало также изменению внутризеренного строения сплава ВТ23: появилась во всех случаях структура «корзинчатого плетения» с пачками небольшого размера α -пластин, толщина которых составила в основном около 2 мкм, наряду с наличием пластин толщиной 0,5–1,0 мкм, а также повышению дефектности α -пластин, но уже по сравнению с отжигом при 860 °С.

После проведения упрочняющей термической обработки для поковок, деформированных по режимам 1, 2, 3, 4, 5, такое предварительное измене-

ние структуры сплава ВТ23 по сравнению с горячедеформированным состоянием, во-первых, вызвало снижение прочности до $\sigma_B = 1285\text{--}1305$ МПа в наружных слоях и до $\sigma_B = 1270\text{--}1285$ МПа в середине (примерно на 30–50 МПа), относительного удлинения до $\delta = 4\%$ (примерно в 1,5 раза) и трещиностойкости (КСТ) на 0,02–0,03 МДж/м² и, во-вторых, не оказало заметного влияния на значения относительного сужения (ψ) и ударной вязкости (КСУ) (табл. 2, режимы 1, 2, 3, 4, 5). Только для случая деформации поковок в интервале 1150 – 900 °С и последующего охлаждения в воде проведение такого же отжига вызвало благоприятное воздействие на характеристики пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости сплава ВТ23 при одновременном снижении прочности примерно на 50 МПа: $\sigma_B = 1255\text{--}1290$ МПа, $\delta = 6\text{--}8\%$, $\psi = 14\text{--}14,5\%$, КСУ = 0,26–0,32 МДж/м², КСТ = 0,10–0,12 МДж/м² (табл. 2, режим 6), что связано в первую очередь с более мелким β -превращенным зерном сплава и выравниванием параметров структуры по сечению поковки. Для поковки, деформированной с 1250 °С и охлажденной на воздухе, проведение отжига при 950 °С, а при 1050 °С еще в большей степени, не оправдано из-за низких значений $\delta = 2\%$ при значениях остальных свойств на следующем уровне: $\sigma_B = 1245$ МПа, $\psi = 11,5\%$, КСУ = 0,22–0,25 МДж/м², КСТ = 0,14 МДж/м² (табл. 2, режим 8).

Проведение предварительного отжига образцов поковок при температуре 1050 °С (на 130 °С выше $t_{п.п.}$) в течение 1 ч и медленное охлаждение до 450 °С способствовали по сравнению с отжигом при 950 °С повышению закономерности в построении структуры: образование β -превращенных зерен правильной полиэдрической формы в результате рекристаллизации с размером $D = 600\text{--}1000$ мкм, толщина α -оторочки в пределах 4–6 мкм, типичное для β -отжига [4] внутризеренное строение, включающее разбивку зерна на несколько колоний с различно ориентированными расположениями групп длинных (в некоторых случаях пересекающих все зерно) α -пластин толщиной 1–3 мкм, α -пластины в основном фрагментированы дислокационными стенками и двойниками. Больших различий в структуре сплава ВТ23 после отжига при температуре 1050 °С в течение 1 ч для поковок, деформированных в различных температурных режимах и охлажденных с различной скоростью, установить затруднительно.

Образование типично «колониальной» структуры с закономерно размещенными длинными α -пластинами и наличием дисперсной α -фазы в сплаве ВТ23 способствовало уже в отожженном

состоянии по сравнению с отжигом при 860 и 950 °С небольшому повышению прочности (за исключением образцов поковки, деформированной по режиму 8 и отожженной при 950 °С) и значительному снижению пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости (см. табл. 1).

Проведение упрочняющей термической обработки образцов поковок, деформированных по режимам 1,2,3,4,5,6 и предварительно отожженных при 1050 °С, по сравнению с горячедеформированным состоянием сплава ВТ23 однозначно вызвало снижение прочности примерно на 40–65 МПа. Причем наблюдали зависимость падения прочности сплава от температурного интервалаковки: чем выше температура начала деформации, тем значительнее снижение прочности. Для поковок, деформированных по режимам 1,2,3, вырезанные образцы имели значения $\sigma_B = 1280$ МПа в наружных слоях и $\sigma_B = 1250$ МПа в середине, а по режимам 4, 5, 6 $\sigma_B = 1240$ МПа в наружных слоях и $\sigma_B = 1180$ МПа в середине. Снизились также значения δ до 4%, ψ до 7–8% (режимыковки 1,2) и также значения ψ до 10–12% (режимы 4,5) и значения δ до 2% и ψ до 6% для образцов режимаковки 6. Снижение ударной вязкости и трещиностойкости по сравнению с термическим упрочнением горячедеформированного сплава ВТ23 составило: КСУ – на 0,04–0,09 МДж/м², КСТ – на 0,02–0,07 МДж/м², т. е. термическое упрочнение сплава ВТ23 с грубой и закономерно построенной структурой обычными методами оказалось неэффективным (табл.2).

Выводы

1. Проведение отжига при температуре 860 °С только увеличивает размеры элементов первичной α -фазы сплава ВТ23, при 950 °С ведет к небольшому увеличению размеров β -зерен и α -оторочки и частичному изменению внутризеренного строения сплава ВТ23 (появление структуры «корзинчатого плетения»), а при 1050 °С – к формированию структуры с β -превращенными зернами правильной полиэдрической формы с наличием ярко выраженной α -оторочки и колониальному, вполне закономерному расположению длинных α -пластин в пределах β -зерен..

2. Появление закономерностей в строении пластинчатой структуры сплава ВТ23 в результате проведения отжига поковок по сравнению с горячедеформированным состоянием и дальнейшая эволюция этих закономерностей приводят к снижению значений σ_B , δ , ψ , КСУ и КСТ.

3. Проведение отжига при температурах 860 и 950 °С при наличии в структуре горячедеформи-

рованного сплава ВТ23 тонких (0,5–1,5 мкм) пластин первичной α -фазы благоприятствует при последующем термическом упрочнении небольшому повышению значений КСЧ, КСТ и ψ за счет растворения более мелких частиц и увеличения толщины α -пластин при отжиге.

4. Проведение отжигов для всех поковок не способствовало заметному выравниванию значений механических свойств сплава ВТ23 по сечению при последующем равноценном термическом упрочнении (760 °С, 30 мин, вода + 450 °С, 8 ч). В частности, образцы, вырезанные из наружных

слоев, по сравнению с образцами, вырезанными из середины поковки, все же имели более высокие значения прочности.

5. Проведение предварительного отжига при температурах 860, 950, 1050 °С в течение 1 ч поковок послековки снижает способность к термическому упрочнению сплава ВТ23 по сравнению с горячедеформированным состоянием на 20–40, 30–50 и 40–60 МПа соответственно в зависимости от температуры предшествующей деформации: повышение температуры началаковки способствует большему снижению способности к термическому упрочнению.

Литература

1. Мальцев М. В., Петрикова Н. В. Изменение периода решетки бета-фазы при изотермическом отжиге титановых сплавов // МиТОМ. 1990. № 3. С. 49.
2. Федурлов В. Н. Механические свойства поковок из сплава ВТ23, полученных деформированием из β -области // Авиационная промышленность. 1991. № 7. С. 42–44.
3. Гриднев В. Н., Ивасшин О. М., Свечников В. Л. Структура α -фазы в двухфазных титановых сплавах // ФММ. 1982. Т. 54. Вып. 2. С. 303–306.
4. Кайбышев О. А., Литфуллин Р. Я., Салищев Г. А. Трансформация пластинчатой микроструктуры в равноосную в титановом сплаве ВТ9 // ФММ. 1988. Т. 66. Вып. 1. С. 966–971.