



The influence of the heating temperature at testing on mechanical characteristics and durability of the samples of plates of melt B23 is investigated.

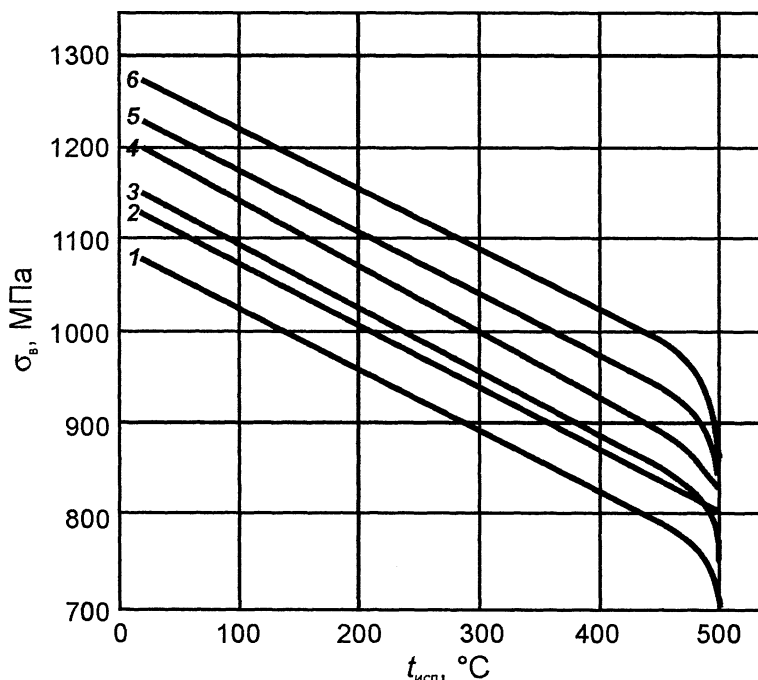
В. Н. ФЕДУЛОВ, БНТУ

УДК 621.74

## РЕЖИМЫ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ И СВОЙСТВА СПЛАВА ВТ23 ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Исследовали влияние температуры нагрева (20–500 °С) при испытании на механические свойства и длительную прочность образцов плиты из сплава ВТ23, термоупрочненных на уровне  $\sigma_b=1080-1280$  МПа с использованием нагрева под закалку в течение 1 ч при температуре 710–850 °С и состаренных при температуре 475, 570, 610 °С в течение 8 ч, а также только старения при 475 °С (8 ч) образцов плиты из сплава ВТ23 в горячедеформированном состоянии. Результаты исследования приведены на рисунке и в таблице.

Сначала исследовали влияние температуры нагрева под закалку на изменение механических свойств при повышенных температурах. Для этого образцы размерами 15x15x80 мм закаливали соответственно с температуры 710 °С в воде, с 770 °С – в масле и с 850 °С – на воздухе, а затем старили при 475 °С. Такие же образцы из плиты старили в горячедеформированном состоянии при 475 °С. Прочность сплава ВТ23 в последнем случае при 20 °С была в пределах  $\sigma_b=1080$  МПа. Повышение температуры нагрева при закалке от 710 до 850 °С соответственно способствовало повышению прочности сплава при 20 °С до  $\sigma_b=1150, 1225$  и 1280 МПа. Из рисунка видно, что прочность сплава ВТ23 при повышении температуры испытания от 20 до 500 °С носит для всех видов упрочнения с использованием старения при 475 °С идентичный характер: до температуры 450 °С (включительно) зависимость  $\sigma_b$  от повышения температуры испытания близка к прямолинейной и имеет примерно один и тот же угол наклона к оси абсцисс. При повышении температуры испытания от 450 до 500 °С происходит более резкое и



Изменение временного сопротивления разрыву образцов плиты толщиной 100 мм из сплава ВТ23, термоупрочненных по различным технологическим схемам, в зависимости от температуры испытания: 1 – исходное состояние + старение: 475 °С, 8 ч; 2 – 850 °С, 60 мин, вода + старение: 610 °С, 8 ч; 3 – 710 °С, 60 мин, вода + старение: 475 °С, 8 ч; 4 – 850 °С, 60 мин, вода + старение: 570 °С, 8 ч; 5 – 770 °С, 60 мин, масло + старение: 475 °С, 8 ч; 6 – 850 °С, 60 мин, воздух + старение: 475 °С, 8 ч

достаточно схожее снижение прочности опять же во всех случаях (кривые 1, 2, 3, 4 на рисунке). Влияние температуры нагрева при закалке образцов плиты на длительную прочность носит несколько иной характер, к тому же здесь определенную роль играет разница в прочности исходных (при  $t_{исп}=20$  °С) образцов. Но тем не менее из рисунка видно, что нагрев под закалку до температуры 850 °С при температуре старения 475 °С уже при температурах испытания 450 и 500 °С начинает проигрывать в значениях длительной прочности (несмотря на исходную более

Длительная прочность образцов плиты из сплава ВТ23 толщиной 100 мм

Режим термического упрочнения	$\sigma_b$ , МПа при температуре +20 °С	$\sigma_b$ , МПа при температуре испытания	Температура испытания, °С	Приложенное напряжение, МПа	Длительная прочность, ч (не менее)	Примечание
Старение 450 °С, 8 ч	1080	850-870	350	830	240	Образцы сняты Разрушен Разрушен
		800	450	600	116	
		710	500	450	39	
710 °С, нагрев 1 ч, охлаждение в воде +475 °С, 8 ч	1150	925	350	880	260	Образцы сняты Разрушен Разрушен
		850	450	600	130	
		750	500	450	37	
760 °С, нагрев 1 ч, охлаждение в воде + 475 °С, 8 ч	1225	1000	350	880	300	Образцы сняты Разрушен Разрушен
		950	450	600	155	
		825	500	450	30	
850 °С, нагрев 1 ч, охлаждение на воздухе + 475 °С, 8 ч	1280	1060	350	880	300	Образцы сняты Разрушен Разрушен
		975	450	600	105	
		850	500	450	28	

высокую прочность) режиму упрочнения, где использовалась закалка с 710 °С или сплав ВТ23 старился в горячедеформированном состоянии (см. таблицу). Образцы, закаленные с 760 °С, начинают уступать по значению длительной прочности двум первым режимам при  $t_{исп.} = 500$  °С. Полученные результаты по длительной прочности при 450–500 °С в данном случае можно объяснить следующим образом. Нагрев под закалку до 760 °С и особенно до 850 °С способствует изменению морфологии первичной  $\alpha$ -фазы, образовавшейся в результате деформации и являющейся весьма устойчивой при нагреве даже до 700 °С. При нагреве до 760 °С и особенно до 850 °С в течение 1 ч происходит процесс частичной коагуляции пластин первичной  $\alpha$ -фазы. Этот процесс, как известно [1], способствует снижению термической стабильности структуры ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов, так как образовавшиеся затем при старении (475 °С, 8 ч) частицы третичной  $\alpha_{тр}$ -фазы весьма неустойчивы при последующем нагреве до 450–500 °С в течение длительного времени.

Последнее заключение подтверждается и тем фактом, что увеличение температуры старения в случае закалки образцов с 850 °С в воде до 570 и 610 °С, хотя и снижало общий уровень прочности термоупрочненного сплава ВТ23, но способствовало повышению длительной прочности при температурах испытания 450 и 500 °С (см. таблицу). Повышение температуры старения до 570 и 610 °С (8 ч) благоприятно сказалось и на сохранении прочности термоупрочненного сплава ВТ23 при температуре испытания 500 °С (см. рисунок, кривые 5, 6), так как прямолинейная зависимость понижения  $\sigma_b$  при повышении  $t_{исп.}$  (кстати, угол наклона прямой части кривых 5 и 6 сохранился и при повышении температуры старения до 570–610 °С) в данном случае про-

длилась вплоть до 500 °С. Одновременно следует отметить, что повышение температуры старения до 610 °С вместо 570 °С также отрицательно сказалось на значениях длительной прочности термоупрочненного сплава ВТ23 при температурах испытания 450 и 500 °С. Это вызвано тем фактом, что в результате нагрева при температуре 610 °С в течение 8 ч образуется более легированная  $\alpha$ -стабилизаторами (по сравнению с нагревом при 570 °С) [2]  $\beta$ -фаза. При последующем охлаждении образцов на воздухе ( $v_{охл.} = 4$  °С/с) она фиксируется в структуре сплава как метастабильная  $\beta_m$ -фаза, повторный длительный нагрев которой при 450 или 500 °С вызывает протекание диффузионных процессов, в результате чего снижается длительная прочность сплава ВТ23.

Данные, представленные на рисунке, могут быть использованы с достаточной степенью точности для прогнозирования эффекта потери прочности (разупрочнения) термически упрочненного сплава ВТ23 при температурах испытания вплоть до 450 °С. Формула, отражающая эффект понижения прочности сплава ВТ23 с пластинчатой структурой при повышении температуры испытания от 20 до 450 °С, может иметь следующий вид:

$$\sigma'_b = \sigma_b^{20} (1 - kt),$$

где  $\sigma'_b$ ,  $\sigma_b^{20}$  – временное сопротивление разрыву сплава ВТ23 при искомой температуре и температуре испытания 20 °С, МПа;  $k$  – коэффициент разупрочнения, равный  $(0,55-0,60) \cdot 10^{-3}$  МПа/град;  $t$  – температура испытания, °С.

Определяли также значения основных эксплуатационных свойств при температуре испытания 20–500 °С образцов плиты из сплава ВТ23, заготовки которых размерами 17x17x100 мм были термоупрочнены по следующим схемам: а) старение при 450 °С в течение 10 ч; б) нагрев при

850 °С в течение 0,5 ч, охлаждение на воздухе + старение при 500 °С в течение 10 ч. После упрочнения горячедеформированного сплава ВТ23 за счет старения при 450 °С (10 ч) при температуре испытания 20 °С имели следующие значения механических свойств:  $\sigma_b=1120$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1040$  МПа,  $E=118000$  МПа,  $\sigma_{\text{ну}}=950$  МПа,  $\delta=10\%$ ,  $\psi=27\%$ ,  $KCU=0,47$  МДж/м<sup>2</sup>,  $KCT=0,28$  МДж/м<sup>2</sup>,  $N$  ( $k_f=2,6$ ,  $\sigma_{\text{max}}=450$  МПа)=34200–84100 циклов ( $N_{\text{сп.}}=47700$  циклов); при 400 °С:  $\sigma_b=900$  МПа,  $\sigma_{0,2}=700$  МПа,  $E=95000$  МПа,  $\sigma_{\text{ну}}=560$  МПа,  $\delta=10\%$ ,  $\psi=37\%$ ,  $\sigma_{100}=770-780$  МПа;  $\sigma_{0,2/100}=350-370$  МПа; при 450 °С:  $\sigma_b=840$  МПа,  $\sigma_{0,2}=680$  МПа,  $E=91000$  МПа,  $\sigma_{\text{ну}}=530$  МПа,  $\delta=12\%$ ,  $\psi=49\%$ ,  $\sigma_{100}=550$  МПа;  $\sigma_{500}=480$  МПа,  $\sigma_{0,2/100}=200$  МПа. При упрочнении заготовок с использованием закалки с 850 °С и старения при 500 °С (10 ч) значения механических свойств были следующими при температуре испытания 20 °С:  $\sigma_b=1225$  МПа,  $\delta=7\%$ ,  $\psi=16\%$ ,  $KCU=0,34$  МДж/м<sup>2</sup>,  $KCT=0,14$  МДж/м<sup>2</sup>,  $N$  ( $k_f=2,6$ ;  $\sigma_{\text{max}}=450$  МПа)=55800–89800 циклов ( $N_{\text{сп.}}=66000$  циклов); при 400 °С:  $\sigma_b=1000$  МПа,  $\delta=9\%$ ,  $\psi=20\%$ ; при 450 °С:  $\sigma_b=950$  МПа,  $\delta=14\%$ ,  $\psi=48\%$ ,  $\sigma_{100}=550$  МПа; при 500 °С:  $\sigma_b=820$  МПа,  $\delta=19\%$ ,  $\psi=66\%$ ,  $\sigma_{100}=480$  МПа.

Большое значение для эксплуатации конструкций при повышенных температурах имеет способность сплава сохранять исходные значения механических свойств после длительной выдержки при температурах эксплуатации. Для горячедеформированного сплава ВТ23, состаренного при 450 °С в течение 10 ч, дополнительная выдержка при температуре 400 или 450 °С в течение 100–1000 ч, по-видимому, способствует дополнительно незначительному распаду  $\beta$ -фазы ( $a_\beta=0,320$  мм после старения при 450 °С в течение 10 ч, а после дополнительных выдержек  $a_\beta=0,318-0,319$  мм), что повышает уровень прочности после выдержки 100 ч соответственно для нагрева при 400 °С до  $\sigma_b=1180$  МПа (после выдержки 1000 ч  $\sigma_b$  понижается до значений 1160 МПа из-за перестаривания) и для нагрева при 450 °С  $\sigma_b=1200$  МПа (1000 ч соответственно  $\sigma_b=1180$  МПа),  $\sigma_{0,2}$  – до 1060 и 1100 МПа;  $E$  снижается до 114000 МПа, как и значения  $\delta$  (7 и 9%),  $\psi$  (19 и 16%), и более

значительно после выдержки 1000 ч – КСУ (до 0,35 МДж/м<sup>2</sup>) и КСТ (до 0,20 МДж/м<sup>2</sup>), а значения  $\sigma_{100}$  и  $\sigma_{0,2/100}$  для температур испытания 400 и 450 °С немного возрастают [3]. Дополнительный распад  $\beta$ -фазы в процессе длительной выдержки при 400 и 450 °С в наибольшей степени способствует снижению малоциклового усталости образцов сплава ВТ23 при комнатной температуре: значения  $N_{\text{сп.}}$  снижаются до 34200–44600 циклов (выдержка при 400 °С) и до 28400–30700 циклов (выдержка при 450 °С).

Для режима упрочняющей термической обработки, включающего закалку заготовок с 850 °С на воздухе и старение при 500 °С (10 ч), влияние длительных выдержек при температурах 400–500 °С на механические свойства сплава ВТ23 с пластинчатой структурой идентично описанному выше [3].

Таким образом, установлено, что закономерное снижение прочности термоупрочненного сплава ВТ23 с пластинчатой структурой наблюдается в интервале температур испытания 20–450 °С. Снижение длительной прочности при температуре 400 и 450 °С вызывает повышение температуры закалки от 710 до 850 °С или повышение температуры старения выше 570 °С. На основании статистики предложена формула, позволяющая прогнозировать прочность сплава ВТ23 в интервале температуры испытания 20–450 °С. Одновременно определены значения основных свойств сплава ВТ23 при температуре испытания 20 и 450 °С, а также показана способность сплава сохранять свои свойства после длительных выдержек при температуре эксплуатации 400 °С в течение 100 и 1000 ч.

### Литература

1. Влияние термической обработки на характеристики прочности титановых сплавов при статическом и циклическом нагружении / В.Н. Фидирко, А.Т. Лизун, Я.С. Щепанский и др. // Проблемы прочности. 1989. № 5. С. 95.
2. Химический состав и свойства  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз титанового сплава ВТ23 / А.А. Ильин, В.М. Майстров, В.В. Засыпкин, М.Ю. Коллеров // Авиационные материалы. 1986. № 1. С. 21–28.
3. Федуров В.Н. Влияние режимов термического упрочнения на свойства заготовок из сплава ВТ23 при повышенных температурах // Авиационная промышленность. 1993. № 3–4. С. 52–54.