



The article is dedicated to the development and industrial assimilation of the fundamentally new methods of thermal strengthening of large articles out of hardenable titanic alloys.

В. Н. ФЕДУЛОВ, БНТУ

УДК 621.74

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Статья посвящена разработке и промышленно-му освоению принципиально новых методов термического упрочнения крупногабаритных изделий из упрочняемых титановых сплавов. Причиной значительного разброса свойств, например сплава ВТ23 по сечению заготовки размером 100x350x400 мм, являются различия при закалке в интенсивности охлаждения и отличия исходной структуры наружных слоев и середины. Вредное влияние первого фактора удалось исключить с помощью создания определенного искусственного градиента температуры по сечению заготовки непосредственно перед интенсивным охлаждением (закалкой) [1]. Нужное распределение температуры по толщине заготовки можно создать при нагреве ее до температуры, например 860°C, и охлаждении на воздухе в течение 5 мин. Получив таким способом необходимый градиент температуры по сечению, заготовку далее охлаждали в воде. После проведения старения при 525°C, 10 ч были получены следующие значения механических свойств по сечению: $\sigma_b = 1220-1250$ МПа, $\delta = 6-7\%$, $\psi = 13-16\%$, КСУ = 0,35–0,40 МДж/м². Таким образом, была предложена методика и разработаны комбинированные способы закалки крупногабаритных заготовок из сплава ВТ23 толщиной до 200 мм: «воздух–вода», «воздух–масло» и «масло–вода», позволившие после старения при 500–550°C в течение 10 ч упрочнять крупногабаритные заготовки на гарантированный уровень $\sigma_b = 1180$ МПа при разбросе по прочности $\Delta\sigma_b < 50$ МПа, удовлетворительной пластичности ($\delta > 5\%$, $\psi > 13\%$) и ударной вязкости (КСУ > 0,3 МДж/м²). Промышленное использование этих способов [2–4] позволило повысить прочность крупногабаритных нервюр, кронштейнов и опор на 100–150 МПа по сравнению с ранее используемыми способами термической обработки. Использование комбинированных способов закалки при упрочнении на гарантированный уровень $\sigma_b = 1180$ МПа обеспечи-

вает выравнивание и одновременное повышение минимальных значений характеристик пластичности в 1,3–1,5 раза, ударной вязкости до 1,5 раза, трещиностойкости до 1,5 раза, малоцикловой усталости в 1,25 раза. Выбор конкретного режима высокотемпературной термической обработки изделия с использованием комбинированных способов охлаждения в каждом конкретном случае должен определяться по крайней мере тремя факторами: массой заготовки, ее толщиной и требованиями по свойствам детали. Учитывая экологические требования, преимущество следует отдать комбинированному способу охлаждения «воздух–вода».

Исследовали влияние типа структуры сплава ВТ23 с неориентированным расположением α -пластин (тип 1) и грубой β -превращенной с колониальным расположением α -пластин (тип 2) на уровень механических свойств поковок 100x200x300 мм при термическом упрочнении. Поковки нагревали до температуры 870°C, выдерживали в течение 1 ч и охлаждали сначала на воздухе в течение 4,5 мин, а далее в воде и старили при температуре 500–600°C в течение 10 ч. Разница в механических свойствах наблюдалась уже после высокотемпературной термической обработки: σ_b у поковок со структурой типа 1 была выше на 40–60 МПа, δ – на 2–4%, ψ – на 13–15%, КСУ – на 0,15–0,20 МДж/м². Проведение старения выявило неспособность к упрочнению поковок с грубой колониальной структурой сплава ВТ23 на уровень, равный 1180 МПа. Изучение поверхностей изломов и определение КСВ показало, что для сплава с колониальной структурой при разрушении сильно развито грубое скольжение, а пластическая деформация неоднородна, причем неоднородность усиливается с увеличением количества выделившихся при старении в β -прослойках частиц мелкодисперсной α -фазы. Поковки со структурой сплава ВТ23 типа 1 упрочнялись на

уровни $\sigma_b > 1280$ МПа ($\delta = 4-6\%$, $\psi = 9-11\%$, $KCU = 0,20-0,25$ МДж/м²) и $\sigma_b > 1180$ МПа ($\delta = 8-10\%$, $\psi = 14-20\%$, $KCU = 0,35-0,43$ МДж/м²). Высокие значения механических свойств обеспечивались за счет равномерного распада β_m -фазы при старении. Получения структуры типа 1 добивались посредством деформации поковок из ($\alpha + \beta$)- и β -области и проведением последеформационного отжига при температуре 860°C в течение 3 ч с последующим медленным охлаждением (до 450°C с печью, а далее на воздухе), а типа 2 – отжигом в β -области. Такое сочетание отжига (структура типа 1) и упрочняющей термической обработки позволяет осуществлять деформацию с температур β -области, что технологически более целесообразно особенно для крупногабаритных полуфабрикатов и добиваться при этом высокого комплекса механических свойств: при температуре старения 590°C: $\sigma_b = 1180-1210$ МПа, $\delta = 8-10\%$, $\psi = 12-20\%$, $KCU > 0,35$ МДж/м², $KCT > 0,15$ МДж/м², $N = 10000-12000$ циклов до разрушения образцов с острым кольцевым надрезом ($K_f = 4,0$, $\sigma_{max} = 40$ кгс/мм²) и $N = 12000-19000$ циклов до разрушения гладких образцов (окисленная поверхность, $\sigma_{max} = 70$ кгс/мм²), а также возможности длительной работы силовых элементов конструкции при температуре 450°C ($\sigma = 60$ кгс/мм²) – 100 ч и кратковременной работы при температуре 500°C ($\sigma = 45$ кгс/мм²) – 30 ч.

Сопоставляя далее для случая закалки с 850°C в воде значения механических свойств по толщине заготовки 100x350x400 мм для случаев старения в течение 10 ч при температуре 500, 525 и 550°C (в особенности значения σ_b), установили, что значительно повысить однородность упрочнения сплава ВТ23 можно, например, если слои закаленной заготовки на глубине 10 мм старить при температуре 550°C, на глубине 30 мм – при 525°C, а в середине – при 500°C [5]. В этом случае можно было бы добиться значений механических свойств по сечению: $\sigma_b = 1300-1320$ МПа, $\psi = 12,5-17\%$, $KCU = 0,32-0,34$ МДж/м². Однако известно, что в течение 10 ч старение с таким распределением температуры по сечению заготовки выполнить технически невозможно. В то же время в течение короткого промежутка времени такой или подобный такому градиент температуры по сечению заготовки создать можно и неоднократно. Термоупрочненную по режиму (нагрев при 850°C в течение 1 ч, охлаждение в воде + старение при 500°C в течение 10 ч) заготовку нагревали в печи Н-60 при температуре 690–700°C в течение 40 мин, а затем охлаждали в воде со скоростью 1–4°C/с (для исключения выпадения охрупчивающих фаз при охлаждении). Подобную манипуляцию повторяли три раза. В результате получили по сечению заготовки значения механических свойств, характеризующиеся высоким уровнем прочности ($\sigma_b = 1190-1220$ МПа) в сочетании с

высокими значениями пластичности ($\psi = 24-32\%$) и ударной вязкости ($KCU = 0,50-0,58$ МДж/м²).

Применение разработанной технологии термического упрочнения [6–8] позволило на практике показать возможность уже сегодня обеспечивать гарантированную прочность крупногабаритных заготовок из титановых сплавов $\sigma_b = 1180$ МПа, $\sigma_b = 1225$ МПа и $\sigma_b = 1280$ МПа при существующей и достаточно неоднородной их структуре. В частности, имеется возможность термического упрочнения заготовки переменного сечения (20–160 мм) из плиты толщиной 160 мм и массой около 30 кг: $\sigma_b > 1180$ МПа, $\Delta\sigma_b < 50$ МПа, $\psi > 18\%$, $KCU > 0,35$ МДж/м². Фасонные поковки упрочняли по схеме: нагрев заготовки до 830°C, выдержка 15 мин, охлаждение в масле + старение: 530°C, 10 ч, охлаждение на воздухе + четырехкратное повторение манипуляции: выдержка в печи Н-60, нагретой до 680°C, в течение 34 мин (с момента загрузки), охлаждение в воде. Удалось достигнуть требуемого уровня и стабилизировать по сечению поковки толщиной от 20 до 160 мм показатель прочности $\sigma_b = 1180-1230$ МПа при значениях $\psi = 11-30\%$, $KCU = 0,30-0,43$ МДж/м², $KCT = 0,12-0,19$ МДж/м², $N = 17000-25500$ циклов (острый надрез).

Повышали комплекс механических свойств поковок размером 100x200x300 мм из сплава ВТ23 с грубой колониальной структурой до гарантированного уровня $\sigma_b = 1180$ МПа. Получение грубой структуры добивались проведениемковки с температуры 1150°C и отжига при 1050°C с медленным охлаждением. Положительного эффекта достигли посредством проведения следующего режима термического упрочнения: нагрев при 780°C в течение 30 мин, охлаждение в воде + старение: 450°C, 12 ч. После проведения закалки и старения поковку помещали в печь Н-30, нагретую до 680°C, на 38 мин и охлаждали в воде, а затем эту операцию повторили пять раз. Эффект термического воздействия на структуру сплава ВТ23 оказался достаточным, чтобы добиться поставленной цели: $\sigma_b = 1180-1215$ МПа, $\delta = 5-6\%$, $\psi = 11,5-16,5\%$, $KCU > 0,25$ МДж/м², $KCT > 0,10$ МДж/м². После старения при 450°C в течение 12 ч удается добиться равновесных для этой температуры химических составов α_{np} - и β -фаз. Соответственно при последующем шестикратном кратковременном нагреве до более высоких температур: наружные слои нагреваются до 540–560°C, а середина – до 500–510°C, выше, чем температура старения на 50–100°C, возникает концентрационный градиент в матричной β -фазе, которая становится пересыщенной по β -стабилизирующим элементам. Это приводит к растворению наиболее мелких частиц α_{np} -фазы в β -фазе. Исходя из равновесных условий, объемная доля β -фазы должна возрастать, хотя и незначительно. β -Фаза становилась в результате кратковременного тер-

мического воздействия менее легированной β -стабилизаторами, так как значение a_β возросло. Изменения, происходящие в структуре термически упрочненного сплава BT23 в результате неоднократного кратковременного термического воздействия, таким образом, обеспечивают возможность получения необходимого сочетания прочности, пластических свойств, ударной вязкости и трещиностойкости поковок с грубой пластинчатой структурой.

Таким образом, созданы научно-методические основы для решения задачи повышения уровня и однородности механических свойств крупногабаритных и фасонных заготовок из $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов. В одном случае разработаны комбинированные способы охлаждения крупногабаритных заготовок при высокотемпературной термической обработке, когда естественному условию получения различных скоростей охлаждения по сечению как альтернатива введено создание искусственного различия начальных температур интенсивного охлаждения: более высокой скорости охлаждения соответствует более низкая температура начала собственно закалки, за счет чего достигается практически одинаковый эффект упрочнения во всех зонах после старения. В другом случае для решения задачи повышения уровня механических свойств и достижения одинакового эффекта упрочнения по сечению крупногабаритных или фасонных заготовок альтернативой различной интенсивности охлаждения по сечению при закалке является введение два или более раз повторяющейся (в зависимости от типа структуры) операции кратковременного нагрева состаренной заготовки в печи при температуре выше температуры предшествовавшего старения с самореализующимся эффектом обеспечения усло-

вий, когда значение конкретной температуры нагрева каждой из зон пропорционально скорости ее охлаждения при закалке. На основе разработанных принципов решена задача термического упрочнения крупногабаритных и фасонных полуфабрикатов из сплава BT23 с различной исходной пластинчатой структурой, а также сварных узлов из листов на гарантированный уровень $\sigma_B \geq 1180$ МПа ($\delta > 6-7\%$, $\psi > 13\%$, $KCU > 0,35$ МДж/м², $KCT > 0,10$ МДж/м²). Показана возможность упрочнения заготовок плит и поковок ($\sigma_B > 1230$ МПа) при значениях $\delta > 6\%$, $\psi > 11\%$, $KCU > 0,30$ МДж/м², $KCT > 0,08$ МДж/м².

Литература

1. Федулов В.Н., Хорев А.И. Оптимизация процесса охлаждения заготовок большого сечения из упрочняемых титановых сплавов // Технология: Оборудование, материалы, процессы. 1998. Вып. 3. С. 42-46.
2. Федулов В.Н., Хорев А.И. Способ термической обработки деталей из $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов: А.с. 1144408 СССР: МКИ С22F1/18.
3. Федулов В.Н., Хорев А.И. Способ термической обработки полуфабрикатов и деталей из двухфазных титановых сплавов: А.с. 1153573 СССР: МКИ С22F1/18.
4. Способ обработки длиномерных полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов / В.Н.Федулов, А.И.Хорев, М.М.Мартынова, А.А.Попов: А.с. 1427863 СССР: МКИ С22F1/18.
5. Федулов В.Н., Хорев А.И. Методика оптимизации технологии термического упрочнения заготовок большого сечения из титановых сплавов // Авиационные материалы. 1998. Вып. 4. С. 10-14.
6. Федулов В.Н., Хорев А.И. Способ термической обработки крупногабаритных полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов: А.с. 1492756 СССР: МКИ С22F1/18.
7. Способ термической обработки деталей из двухфазных титановых сплавов / В.Н.Федулов, А.И.Хорев, М.М.Мартынова, С.Л.Демаков: А.с. 1584425 СССР: МКИ С22F1/18.
8. Способ термической обработки полуфабрикатов переменного сечения / В.Н.Федулов, А.И.Хорев, С.Л.Демаков, А.А.Попов: А.с. 1593276 СССР: МКИ С22F1/18.