



The methods, enabling to produce the comparative appraisal of the titanium alloy ability to harden as a result of high-temperature thermal-mechanical processing depending on temperature and rate of deformation at forging, is developed.

В. Н. ФЕДУЛОВ, БНТУ

УДК 674.21.

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СПОСОБНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ К ТЕРМИЧЕСКОМУ УПРОЧНЕНИЮ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВТМО

Всесторонняя ковка является основной схемой подготовки структуры при производстве поковок ответственного назначения из титановых сплавов. Температура, степень и скорость деформации и условия охлаждения после деформации оказывают существенное влияние на механические свойства и характеристики их работоспособности [1–3]. Но до сих пор нет единой методики по оценке способности титановых сплавов к последующему термическому упрочнению в зависимости от температуры и степени предшествующей деформации. Однозначно лишь установлено [4], что при термическом упрочнении на уровень $\sigma_B > 1080$ МПа предпочтение следует отдавать полуфабрикатам с нерекристаллизованной структурой ввиду обеспечения более высокого комплекса механических свойств по сравнению с рекристаллизованной структурой.

В настоящей работе сделана попытка рассмотрения одного из вопросов этой проблематики на примере сплава ВТ23 ($t_{п.п.} = 920$ °С): разработка вышеупомянутой методики для решения задачи по выбору режимов ковки. Фасонные поковки (рис. 1) получали ковкой с температуры 900, 1050 и 1150 °С из заготовок плиты размерами 130×200×200 мм на молотах с массой падающих частей 3000 кг (при деформации с 900 °С) и 750 кг (с 1050 и 1150 °С). Деформацию проводили за один раз по следующей технологической схеме. Осуществляли нагрев заготовки до температуры ковки в газовой печи, выдерживали в течение 30 мин, получали поковку размерами 160×160×200 мм осадкой заготовки по плоскости 130×200 мм и последующей протяжкой, а затем формировали поковку требуемой формы путем «оттягивания» от ее массивной части клиновидной. После деформации охлаждение поковок производили на воздухе. В сечении 20 мм скорость охлаждения составляла $v_{охл.} = 0,7–1,0$ °С/с, в сече-

нии 160 мм $v_{охл.} = 0,2–0,3$ °С/с. Затем исследовали структуру и определяли механические свойства (σ_B , ψ , КСЧ, КСТ) после деформации и дополнительного старения при температуре 450 °С в течение 8 ч и малоцикловую усталость (острый кольцевой надрез $r = 0,1$ мм, $k_t = 4,0$; $\sigma_{max} = 400$ МПа; $\sigma_{min} = 150$ МПа; $\nu = 5$ Гц) только после старения. Образцы вырезали из сечений поковки толщиной 20 мм ($\epsilon = 85\%$), 40 мм ($\epsilon = 75\%$), 60 мм ($\epsilon = 60\%$), 100 мм ($\epsilon = 45\%$), 130 мм ($\epsilon = 25\%$) и 160 мм ($\epsilon = 12–15\%$).

Характерной особенностью деформации среднелегированных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов при температурах верхней части ($\alpha+\beta$)-области является то, что она влечет за собой обычно одновременное изменение β -зерен и α -пластин. Они сплющиваются, вытягиваются вдоль направления течения металла, ускоряется процесс рекристаллизации и измельчения за счет этого зеренной и внутриз-

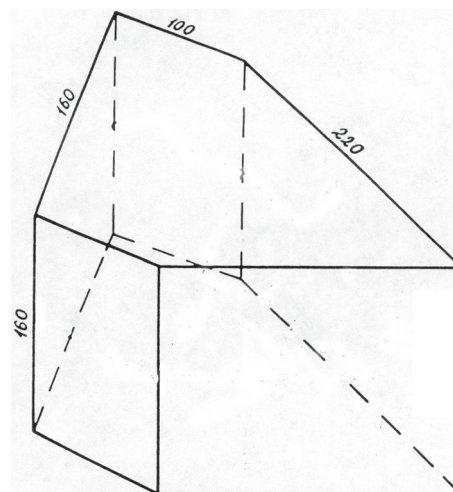


Рис. 1. Схема общего вида заготовки переменного сечения для прогнозирования результатов термического упрочнения поковок из сплава ВТ23

ренной структуры. Увеличение степени деформации приводит к дальнейшему измельчению структуры. Наиболее оптимальным считают степень деформации $\varepsilon = 40\text{--}60\%$. В общем случае структурные превращения в $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавах при горячей деформации в $(\alpha+\beta)$ -области связывают с развитием нескольких одновременно протекающих процессов: динамической рекристаллизации, полиморфного превращения и сфероидизации. Несколько иначе протекает процесс деформации в верхней части $(\alpha+\beta)$ -области высоколегированного сплава ВТ22. Например, после деформации при $850\text{ }^\circ\text{C}$ в структуре сплава рекристаллизованные зерна отсутствовали при всех степенях деформации. Промежуточная картина выявлена при ковке с $900\text{ }^\circ\text{C}$ (окончание при температуре около $820\text{ }^\circ\text{C}$) сплава ВТ23. При степени деформации $\varepsilon > 60\%$ (толщина поковки от 20 до 60 мм) структура частично рекристаллизована и неоднородна по сечению. Крупные зерна вытянуты в направлении деформации, по границам бывших β -зерен в некоторых местах сохранилась α -оторочка. Внутризеренная структура представляет собой мелкие блоки α -фазы с весьма различной ориентировкой. Внутризеренная структура при $\varepsilon < 60\%$ (массивная часть поковки) характеризуется большой степенью неоднородности размеров скоплений α -пластин и толщины самих пластин. При степенях деформации $25\% < \varepsilon < 45\%$ (толщина сечения поковки от 100 до 130 мм) в структуре сплава наряду с нерекристаллизованными зернами имеются в небольшом количестве более мелкие рекристаллизованные β -зерна (больше в середине сечений), имеющие извилистые границы. Они образовались, по всей видимости, из-за сильной неоднородности деформации в этих зонах поковки. При степени деформации $\varepsilon < 25\%$ (толщина поковки более 130 мм) рекристаллизованные β -зерна весьма малы и обнаруживаются лишь в середине сечения на стыках больших нерекристаллизованных β -зерен. Количественную оценку структуры произвести практически невозможно.

Авторы работы [5] отмечали, что проведение всестороннейковки литых заготовок в $(\alpha+\beta)$ -области высоколегированных двухфазных титановых сплавов без предварительной подготовки структуры [6] крайне неэффективно с позиций получения однородной структуры, так как операция осадки здесь характеризуется неоднородным деформированным состоянием из-за влияния контактных сил трения и подстуживающего воздействия инструмента. Ковка повок из сплава ВТ23 с исходной неоднородной структурой с $900\text{ }^\circ\text{C}$ в данном случае подтверждает сделанные выше выводы: структура спла-

ва во всех сечениях неоднородна, параметры структуры установить затруднительно. Однако для сплава ВТ23 наличие полностью некристаллизованной или частично рекристаллизованной структуры [4] достаточно благоприятно сказывается на повышении уровня механических свойств при последующем термическом упрочнении. В данном случае (рис. 2) после деформации с охлаждением на воздухе при возрастании степени деформации от 12–15 до 60% наблюдается плавное пропорциональное повышение прочности и относительного сужения как в наружных слоях, так и в середине фасонной поковки: σ_B повышается от значений 1090–1120 МПа ($\varepsilon = 12\text{--}15\%$) до 1120–1150 МПа ($\varepsilon = 60\%$) и ψ – от 20–26% ($\varepsilon = 12\text{--}15\%$) до 26–31% ($\varepsilon = 60\%$), при одновременном снижении ударной вязкости (КСУ): от 0,54–0,56 МДж/м² ($\varepsilon = 12\text{--}15\%$) до 0,48–0,52 МДж/м² ($\varepsilon = 60\%$) и удельной работы вязкости разрушения образцов с трещиной (КСТ): от 0,21–0,26 МДж/м² ($\varepsilon = 12\text{--}15\%$) до 0,21–0,25 МДж/м² ($\varepsilon = 60\%$).

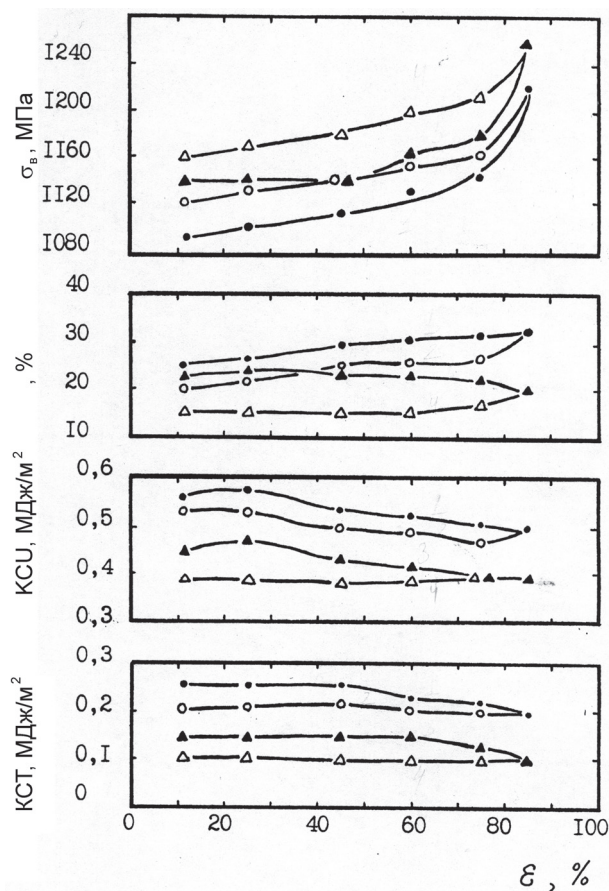


Рис. 2. Влияние степени деформации при ковке фасонных повок с температуры $900\text{ }^\circ\text{C}$ на механические свойства сплава ВТ23 (•, ○ – послековки и охлаждения на воздухе; ▲, △ – после дополнительного старения: $450\text{ }^\circ\text{C}$, 8 ч); ○, △ – наружные слои поковки; •, ▲ – середина

Такое изменение свойств вызвано измельчением внутризеренной структуры при увеличении степени деформации от 12–15 до 60%, в частности, измельчением блоков α -пластин и уменьшением длины α -пластин, а также увеличением количества дисперсной α -фазы, образовавшейся в β -фазе в процессе охлаждения поковок на воздухе после деформации. Одновременно с увеличением степени деформации возрастает степень дефектности структуры. Особенно сильно это начинает сказываться при увеличении степени деформации $\varepsilon > 60\%$, что приводит к смене характера зависимости $\sigma_B - \varepsilon$ от прямолинейного к параболическому виду. Повышение дефектности структуры в результате деформации со степенью деформации $\varepsilon > 60\%$ способствует образованию большого количества мелкодисперсной α -фазы при охлаждении поковок на воздухе в сечениях толщиной 20–40 мм со скоростью $\approx 0,7^\circ\text{C}/\text{с}$. Можно также предположить, что при степени деформации $\varepsilon > 60\%$ (при данной температуре начала деформации 900°C) и при последующем охлаждении на воздухе образуется развитая субзеренная структура в α - и β -фазах. В результате деформации с 900°C со степенью деформации $\varepsilon > 60\%$ имели следующие значения механических свойств: при $\varepsilon = 75\%$ $\sigma_B = 1150\text{--}1170$ МПа, $\psi = 27\text{--}32\%$, $KCU = 0,47\text{--}0,51$ МДж/м², $KCT = 0,20\text{--}0,23$ МДж/м², а при $\varepsilon = 85\%$ $\sigma_B = 1220$ МПа, $\psi = 33\%$, $KCU = 0,5$ МДж/м², $KCT = 0,20$ МДж/м². Одновременно с повышением степени деформации уменьшается разница в значениях механических свойств между наружными слоями и серединой поковки. Фазовый состав сплава ВТ23 во всех сечениях фасонной поковки, полученной деформацией с 900°C и охлажденной на воздухе, представлен метастабильной β -фазой ($a_\beta = 0,321$ нм) и α -фазой.

Проведение старения при температуре 450°C в течение 8 ч способствует распаду метастабильной β_M -фазы в структуре сплава ВТ23 и вызывает вполне закономерный рост прочности примерно на 40–50 МПа в наружных слоях и в середине фасонной поковки и снижение пластичности и ударной вязкости сплава ВТ23 (рис. 2). При этом закономерность влияния степени деформации на прочностные свойства сплава ВТ23 сохраняется в том же виде, что и после деформации, а уровень механических свойств остается достаточно высоким: для степени деформации $\varepsilon = 12\text{--}15\%$ (толщина сечения поковки 160 мм) $\sigma_B = 1130\text{--}1160$ МПа, $\psi = 15\text{--}20\%$, $KCU = 0,39\text{--}0,45$ МДж/м², $KCT = 0,10\text{--}0,13$ МДж/м²; для $\varepsilon = 45\%$ (толщина сечения поковки 100 мм) $\sigma_B = 1135\text{--}1175$ МПа, $\psi = 15\text{--}24\%$, $KCU = 0,39\text{--}0,43$ МДж/м², $KCT = 0,11\text{--}0,14$ МДж/м²; для $\varepsilon = 60\%$ (толщина сечения поковки 60–70 мм)

$\sigma_B = 1160\text{--}1200$ МПа, $\psi = 15\text{--}24\%$, $KCU = 0,39\text{--}0,42$ МДж/м², $KCT = 0,10\text{--}0,14$ МДж/м²; для $\varepsilon = 85\%$ (толщина сечения 20 мм) $\sigma_B = 1260$ МПа, $\psi = 20\%$, $KCU = 0,40$ МДж/м², $KCT = 0,10$ МДж/м². Изменение механических свойств фасонных поковок из сплава ВТ23 после деформации с охлаждением на воздухе и старения определяется влиянием степени деформации и распадом высокотемпературной β -фазы в результате охлаждения на воздухе с образованием дисперсных продуктов, а также влиянием распада метастабильной β_M -фазы с выделением мелкодисперсных пластин третичной $\alpha_{тр}$ -фазы в процессе старения. Так как на прочность сплава все факторы действуют в одном направлении, то закономерность изменения σ_B (рис. 3) сохраняется после проведения старения в том же виде, что и после деформации. Влияние же старения (выделение в структуре мелкодисперсных частиц вторичной α -фазы) на пластические характеристики (ψ) и ударную вязкость (KCU) и трещиностойкость (KCT) оказывается таким, что оно нивелирует влияние степени деформации, сглаживая ход кривых изменения величины ψ , но меньше влияет на характер изменения KCU и KCT .

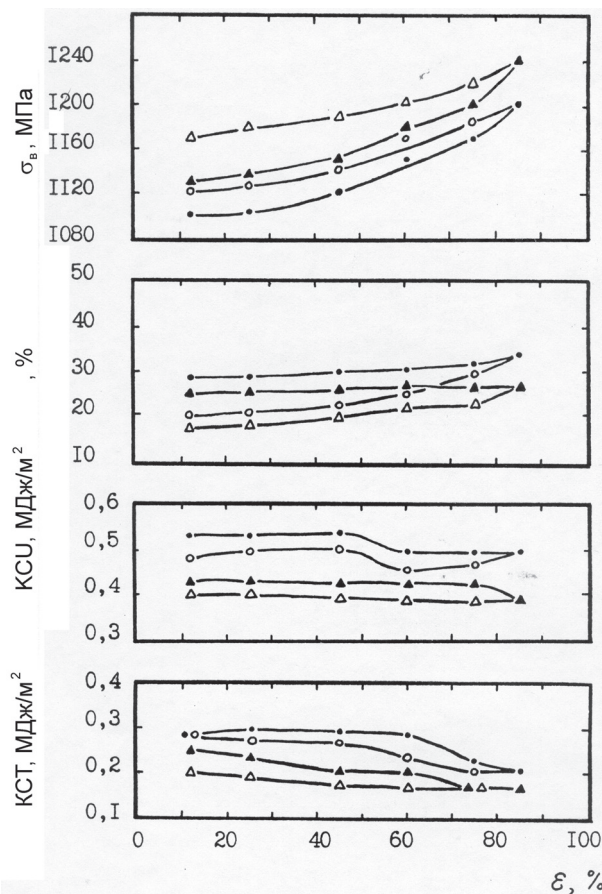


Рис. 3. Влияние степени деформации при ковке фасонных поковок с температуры 1050°C на механические свойства сплава ВТ23. Обозначения те же, что на рис. 2

Из рис. 2 следует также, что получение значений $\sigma_b > 1180$ МПа (120 кг с/мм^2) при термическом упрочнении в результате старения при 450°C в течение 8 ч можно достичь по всему сечению поковки только в результате окончательной деформации с 900°C со степенью 75% и более и при толщине сечения 40 мм и менее. Уровня упрочнения $\sigma_b > 1130$ МПа (115 кг с/мм^2) можно достигнуть при степени деформации 45% и более и толщине сечения 100 мм и менее, что вполне достижимо в условиях производства для большинства поковок и штамповок средней массы, прутков и даже для плит. При степени деформации менее 40% и толщине поковок более 100 мм можно достигать уровня упрочнения поковок $\sigma_b > 1080$ МПа (110 кг с/мм^2). При промышленном производстве полуфабрикатов на уровень их упрочнения в результате старения наряду со степенью деформации и толщиной полуфабриката будет оказывать влияние также его масса. Но как методика сравнения возможностей, заложенных в химическом составе сплавов, предложенный способ исследования в полной мере отвечает поставленной задаче.

Структура сплава ВТ23, полученная при деформации фасонной поковки с 900°C , в значительной мере из-за своей неоднородности вызывает разброс значений малоциклового усталости составленных образцов с острым кольцевым надрезом ($r = 0,1 \text{ мм}$, $k_t = 4,0$; $\sigma_{\text{max}} = 400$ МПа, $\sigma_{\text{min}} = 150$ МПа; $\nu = 5 \text{ Гц}$): для $\varepsilon = 85\%$ $N = 25\ 000$ циклов; для $\varepsilon = 60\%$ $N = 20\ 500\text{--}40\ 000$ циклов; для $\varepsilon = 12\text{--}15\%$ $N = 19\ 500\text{--}30\ 000$ циклов, хотя общий уровень малоциклового усталости следует считать вполне удовлетворительным.

Деформация из β -области для высоколегированных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов облегчает задачу получения крупногабаритных кованных и катаных заготовок и в то же время, например для сплава ВТ23 [7], позволяет понизить скорость роста усталостной трещины при упрочнении до 1050 МПа. Повышение температуры началаковки фасонной поковки из сплава ВТ23 до 1050°C (выше $t_{\text{п.п.}}$ на 130°C) позволило выполнить операциюковки на молоте с массой падающих частей 750 кг вместо 3000 кг приковки с 900°C (выигрыш в мощности почти в 4 раза), но при этом интенсивность деформации была примерно такой же, что и приковки с 900°C на более мощном молоте, что необходимо для исключения дополнительного учета скорости деформации. Отличие микроструктуры фасонной поковки, полученнойковки с 1050°C , состояло в том, что в сплаве ВТ23 прошла рекристаллизация во всех сечениях поковки, т. е. при всех степенях деформации от 15 до 85%. Наиболее выгодно

отличались сечения поковки толщиной 20 и 40 мм ($\varepsilon = 85$ и 75%), так как в микроструктуре наблюдали рекристаллизованные β -зерна диаметром 100–200 мкм с наличием тонкой α -оторочки и внутризерненным строением α -пластин в виде корзинчатого плетения.

Уменьшение степени деформации ε до 60% (сечение толщиной 60 мм) приводило к увеличению размера β -зерна до 300–400 мкм и появлению неоднородности микроструктуры при переходе от наружных слоев к середине. По-видимому при такой мощности молота (масса падающих частей 750 кг) и температуре началаковки 1050°C середина поковки при толщине сечения 60 мм и более прорабатывалась менее эффективно, в результате чего здесь размер β -зерна был большим, а внутризерненная структура оказалась ближе к колониальному расположению α -пластин. Уменьшение степени деформации и одновременное снижение скорости охлаждения послековки, начиная с сечения 100 мм ($\varepsilon = 45\%$) и более, способствовали увеличению диаметра β -зерна до 600–800 мкм и более, мало изменяя внутризерненную структуру по сравнению с деформацией, когда $\varepsilon = 60\%$: увеличились лишь длина α -пластин и размеры α -колоний. Следует также отметить, что β -зерна в структуре сплава во всех сечениях поковки были в основном неправильной формы по сравнению со строением β -зерен при статической рекристаллизации. Описанный выше характер микроструктуры сплава ВТ23 предопределил получение достаточно хороших механических свойств во всех сечениях поковки как сразу после деформации с охлаждением на воздухе, так и после проведения дополнительного старения: 450°C , 8 ч (рис. 3). В данном случае зависимость прочности (σ_b) сплава ВТ23 от степени деформации (общий уровень упрочнения мало изменился) уже отличается отковки с 900°C : повышение степени деформации от 12–15 до 85% вызвало фактически более монотонное возрастание σ_b , без скачкообразного увеличения при степени деформации более 60%. Это, по-видимому, связано с тем, что более высокая температура окончания деформации способствовала «залечиванию» части дефектов структуры в процессе охлаждения поковки на воздухе. Второй отличительной чертой явилось повышение значений относительного удлинения (ψ) и удельной работы вязкости разрушения КСТ по сравнению с деформацией от 900°C и особенно после старения (450°C , 8 ч). На наш взгляд, повышение этих показателей связано в первую очередь с наличием в структуре более «толстых» ($\approx 2 \text{ мкм}$) пластин α -фазы и менее дефектной β -зерненной и внутризерненной структуры сплава

BT23 после деформации с температуры 1050 °С. Для степени деформации $\varepsilon = 12\text{--}15\%$ (толщина сечения 160 мм) значения механических свойств сплава BT23 были следующими: после деформации $\sigma_B = 1100\text{--}1120$ МПа, $\psi = 25\text{--}28\%$, КСУ = 0,48–0,53 МДж/м², КСТ = 0,27 МДж/м², после старения $\sigma_B = 1130\text{--}1170$ МПа, $\psi = 18\text{--}20\%$, КСУ = 0,40–0,43 МДж/м², КСТ = 0,20–0,25 МДж/м²; для $\varepsilon = 45\%$ (толщина сечения поковки 100 мм) $\sigma_B = 1120\text{--}1140$ МПа, $\psi = 25\text{--}30\%$, КСУ = 0,50–0,54 МДж/м², КСТ = 0,27–0,30 МДж/м² (после деформации) и $\sigma_B = 1150\text{--}1190$ МПа, $\psi = 20\text{--}22\%$, КСУ = 0,38–0,42 МДж/м², КСТ = 0,18–0,20 МДж/м² (после старения); для $\varepsilon = 60\%$ (толщина сечения 60–70 мм) $\sigma_B = 1145\text{--}1165$ МПа, $\psi = 26\text{--}30\%$, КСУ = 0,45–0,50 МДж/м², КСТ = 0,2–0,22 МДж/м² (после деформации) и $\sigma_B = 1180\text{--}1200$ МПа, $\psi = 22\text{--}25\%$, КСУ = 0,38–0,42 МДж/м², КСТ = 0,17–0,20 МДж/м² (после старения); для $\varepsilon = 85\%$ (толщина сечения ≈ 20 мм) $\sigma_B = 1200$ МПа, $\psi = 34\%$, КСУ = 0,5 МДж/м², КСТ = 0,20 МДж/м² (после деформации) и $\sigma_B = 1240$ МПа, $\psi = 27\%$, КСУ = 0,38 МДж/м², КСТ = 0,17 МДж/м² (после старения), т. е. эффект упрочнения в результате старения составил также 40–50 МПа, как и после деформации с 900 °С.

В то же время показатели малоциклового усталости образцов с острым надрезом оказались несколько ниже по сравнению с поковкой, деформированной с 900 °С: для $\varepsilon = 85\%$ $N = 17\ 900$ циклов, для $\varepsilon = 45\%$ $N = 18\ 000\text{--}30\ 000$ циклов, $\varepsilon = 12\text{--}15\%$ $N = 16\ 700\text{--}35\ 000$ циклов. Это может быть объяснено тем, что после деформации с 900 °С в структуре сплава BT23 более развита субзеренная структура [8] и тоньше пластины первичной α -фазы.

Таким образом, переход на ковку в β -область с температуры на 130 °С выше $t_{\text{п.п.}}$ позволил по сравнению с деформацией от 900 °С при всех степенях деформации повысить вязкость разрушения (КСТ) сплава BT23, а при $\varepsilon > 75\%$ дал возможность получить мелкозернистую структуру.

Еще большего эффекта в части измельчения β -зерна и внутризеренной структуры удалось добиться при получении фасонной поковки деформацией с 1150 °С (выше $t_{\text{п.п.}}$ на 230 °С), что потребовало проведения более детального исследования этого процесса [9]. В массивной части поковки от толщины сечения больше, чем 130 мм ($\varepsilon = 12\text{--}25\%$) в структуре сплава BT23 наблюдали послековки крупные β -зерна правильной формы диаметром 600–800 мкм с четкими границами, отороченные α -фазой. Внутризеренное строение близко к структуре «корзинчатого плетения», хотя размеры блоков α -пластин нестабильны. С повышением степени деформации $\varepsilon > 25\%$ начинает проявляться тен-

денция к измельчению β -зерна: при $\varepsilon = 45\%$ (толщина сечения 100 мм) размер β -зерен $D = 300\text{--}400$ мкм при $\varepsilon = 60\%$ (толщина сечения 60–70 мм) $D = 250\text{--}400$ мкм (зерна равноосные, но с извилистыми краями), при $\varepsilon = 85\%$ $D = 150\text{--}450$ мкм, но уже отмечается неоднородность структуры из-за наличия отдельных β -зерен размером до 450 мкм. Внутризеренное строение во всех сечениях характеризовалось наличием малого числа блоков пластин α -фазы различной ориентации и размеров. Вместе с этим следует отметить строгую корреляцию размеров β -зерен и размеров блоков и самих α -пластин: чем крупнее β -зерно, тем больше размеры блоков и длиннее пластины. В то же время и особенно при $\varepsilon = 60\text{--}85\%$ в основном наблюдали наличие значительного количества не ориентированно расположенных и более коротких пластин α -фазы. Границы β -зерен практически во всех случаях оторочены α -фазой. С повышением степени деформации $\varepsilon > 75\%$ характерно формирование микрозерен с несовершенной формой и извилистыми границами.

Для тонкой структуры сплава в сечениях толщиной 20–60 мм ($\varepsilon = 60\text{--}85\%$) характерно наличие α -пластин толщиной 0,3–0,8 мкм с нечеткими границами и со значительной дефектностью (дислокации и двойники), различной длины, а также сильно травящейся β_M -фазы. С увеличением толщины сечения до 100 мм ($\varepsilon = 45\%$) наблюдается более строгая закономерность в ориентации α -пластин толщиной 0,5–2,0 мкм, хотя длина их остается весьма различной. Дефектность α -фазы сохраняется. Для сечений толщиной 130 мм и более ($\varepsilon < 25\%$) пачки α -пластин с одинаковой ориентацией и близкими размерами (толщиной 0,5–2,5 мкм), границы α -пластин четкие, в пластинах присутствуют отдельные дефекты в виде дислокационных петель.

Рентгенографические исследования показали, что при всех степенях деформации и последующего охлаждения на воздухе в наружных слоях и середине поковки параметр решетки β -фазы остается примерно на одном уровне: $a_\beta = 0,3212\text{--}0,3215$ нм и лишь при толщине сечения 130 мм и более наблюдается разница в значениях a_β между наружными слоями и серединой: 0,3220 и 0,3213 нм. Влияние на изменение параметра решетки в данном случае оказали два фактора: во-первых, повышение степени деформации активизировало процессы распада высокотемпературной β -фазы, во-вторых, с увеличением степени деформации уменьшалась толщина сечения поковки, что обуславливало более высокую скорость охлаждения сплава, а значит, и повышение нестабильности β_M -фазы. В более массивной части поковки при более низких

степенях деформации ($\epsilon < 25\%$) в средних слоях из-за более низкой скорости охлаждения происходил более полный распад высокотемпературной β -фазы, в то время как в наружных слоях этот процесс замедлялся.

Зависимость механических свойств горячедеформированного сплава ВТ23 от степени деформации при ковке с $1150\text{ }^\circ\text{C}$ имеет примерно тот же вид, что и послековки с $1050\text{ }^\circ\text{C}$. Но имеются два существенных отличия (рис. 4). Во-первых, более высокие значения относительного удлинения (ψ) при всех степенях деформации, что может быть объяснено формированием более мелкого β -зерна и менее совершенной (отсутствием закономерности в расположении α -пластин) внутризеренной структуры сплава ВТ23 послековки с $1150\text{ }^\circ\text{C}$. Во-вторых, ударная вязкость (КСУ) при степени деформации более 45% также выше из-за наличия более мелкозернистой структуры. В общем случае механические свойства поковки после деформации были следующими: для $\epsilon = 12\text{--}14\%$ (толщина сечения 160 мм) $\sigma_B = 1090\text{--}1120\text{ МПа}$, $\psi = 25\text{--}35\%$, КСУ = $0,45\text{--}0,48\text{ МДж/м}^2$, КСТ = $0,25\text{--}0,28\text{ МДж/м}^2$; для $\epsilon = 45\%$ (толщина сечения 100 мм) $\sigma_B = 1120\text{--}$

1140 МПа , $\psi = 30\text{--}37\%$, КСУ = $0,45\text{--}0,50\text{ МДж/м}^2$, КСТ = $0,21\text{--}0,25\text{ МДж/м}^2$; для $\epsilon = 60\%$ (толщина сечения $60\text{--}70\text{ мм}$) $\sigma_B = 1150\text{--}1170\text{ МПа}$, $\psi = 35\text{--}40\%$, КСУ = $0,47\text{--}0,53\text{ МДж/м}^2$, КСТ = $0,20\text{--}0,22\text{ МДж/м}^2$; для $\epsilon = 85\%$ (толщина сечения 20 мм) $\sigma_B = 1200\text{ МПа}$, $\psi = 43\%$, КСУ = $0,45\text{ МДж/м}^2$, КСТ = $0,17\text{ МДж/м}^2$.

Температура старения $450\text{ }^\circ\text{C}$ (8 ч) способствует упрочнению горячедеформированного с температуры $1150\text{ }^\circ\text{C}$ сплава ВТ23 за счет выделения мелкодисперсной $\alpha_{\text{тр}}$ -фазы в β -матрице в сечениях толщиной $60\text{--}160\text{ мм}$ ($\epsilon = 12\text{--}60\%$) примерно на 70 МПа , а в сечениях толщиной $20\text{--}40\text{ мм}$ ($\epsilon = 75\text{--}85\%$) – на $80\text{--}100\text{ МПа}$ (рис. 4). Следует отметить, что распад метастабильной β_M -фазы при старении происходил через образование α'' -фазы [10], о чем свидетельствовало наличие слабых линий α'' -фазы на дифрактограммах состаренных образцов. Линии β_M -фазы в этом случае сильно размыты и имеют малую интенсивность. В целом старение при $450\text{ }^\circ\text{C}$ приводило к уменьшению параметра решетки β_M -фазы, причем наиболее интенсивное уменьшение a_β наблюдали при больших ($\epsilon > 60\%$) степенях деформации, что, по-видимому, обусловлено активизацией распада β_M -фазы на дефектах и вызвало наибольший прирост прочности по сравнению с другими исследованными сечениями поковки (рис. 4). Из рисунка видно, что послековки с температуры $1150\text{ }^\circ\text{C}$ (охлаждение на воздухе) и последующего старения при $450\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 8 ч удалось обеспечить следующие уровни механических свойств: для $\epsilon = 12\text{--}25\%$ (толщина сечения $130\text{--}160\text{ мм}$) $\sigma_B = 1160\text{--}1200\text{ МПа}$, $\psi = 15\text{--}20\%$, КСУ = $0,35\text{ МДж/м}^2$, КСТ = $0,15\text{--}0,20\text{ МДж/м}^2$; при $\epsilon = 45\%$ (толщина сечения 100 мм) $\sigma_B = 1190\text{--}1230\text{ МПа}$, $\psi = 17\text{--}23\%$, КСУ = $0,35\text{--}0,39\text{ МДж/м}^2$, КСТ = $0,13\text{--}0,15\text{ МДж/м}^2$; для $\epsilon = 60\%$ (толщина сечения $60\text{--}70\text{ мм}$) $\sigma_B = 1220\text{--}1240\text{ МПа}$, $\psi = 20\text{--}25\%$, КСУ = $0,36\text{--}0,40\text{ МДж/м}^2$, КСТ = $0,13\text{--}0,15\text{ МДж/м}^2$; для $\epsilon > 75\%$ (толщина сечения $20\text{--}40\text{ мм}$) $\sigma_B > 1260\text{ МПа}$, $\psi > 25\%$, КСУ = $0,37\text{--}0,40\text{ МДж/м}^2$, КСТ = $0,10\text{--}0,12\text{ МДж/м}^2$. Малоцикловая усталость образцов с острым кольцевым надрезом фасонной поковки, деформированной с $1150\text{ }^\circ\text{C}$ и охлажденной на воздухе, после старения оказалась также более высокой и однородной: для $\epsilon = 85\%$ $N = 26\text{ }000$ циклов; для $\epsilon = 75\%$ $N = 30\text{ }000\text{--}32\text{ }000$ циклов; для $\epsilon = 60\%$ $N = 26\text{ }000\text{--}30\text{ }000$ циклов; для $\epsilon = 45\%$ $N = 24\text{ }000\text{--}30\text{ }000$ циклов; для $\epsilon = 12\text{--}15\%$ $N = 26\text{ }000\text{--}28\text{ }500$ циклов. Комплекс механических свойств фасонных поволоков, деформированных с температуры $1150\text{ }^\circ\text{C}$, оказался выше, чем послековки с 1050 и $900\text{ }^\circ\text{C}$, что можно объяснить получением более мелкозернистой и однородной структуры с менее совершен-

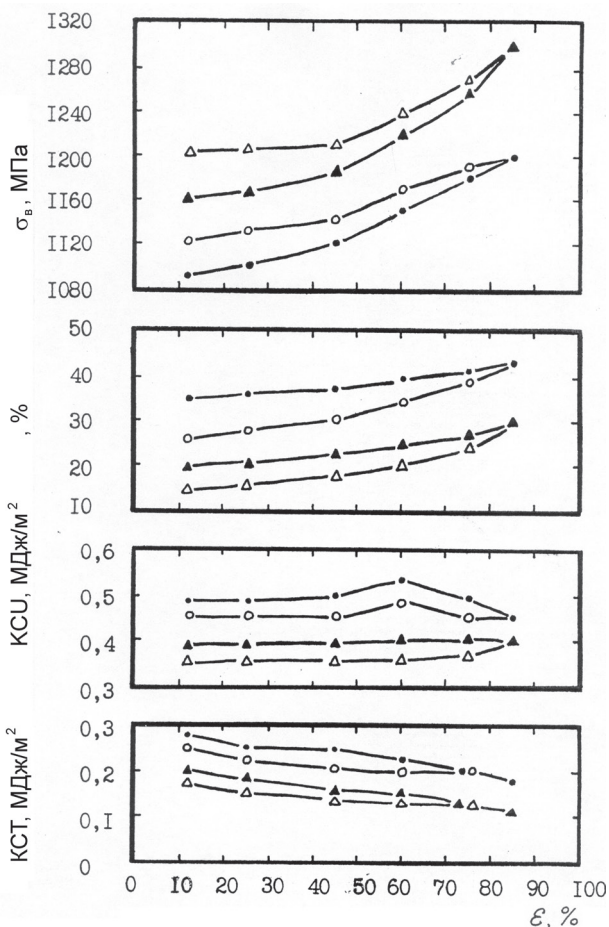


Рис. 4. Влияние степени деформации при ковке фасонных поволоков с температуры $1150\text{ }^\circ\text{C}$ на механические свойства сплава ВТ23. Обозначения те же, что на рис. 2

ным и дисперсным внутризеренным строением [11] за счет более интенсивного проведения процесса деформации.

Выводы

1. Разработана методика, позволяющая производить сравнительную оценку способности титанового сплава к упрочнению в результате высокотемпературной термомеханической обработки в зависимости от температуры и степени деформации при ковке на основе единого подхода и формирования фасонной поковки одного и того же размера.

2. Изучены результаты формирования структуры и механические свойства сплава ВТ23, деформированного с температуры 900, 1050 и 1150 °С со степенью деформации 12–85%. Показано, что увеличение степени деформации при всех температурах нагрева при ковке и последующем охлаждении на воздухе способствует повышению значений σ_b , ψ и небольшому снижению значений КСЧ (для температур 900 и 1050 °С) или сохранению их на примерно одинаковом уровне (1150 °С) и сниже-

нию значений КСТ (для 1050 и 1150 °С) или сохранению их на одном уровне (900 °С) и во всех случаях повышению однородности свойств по сечению.

3. При температурахковки 1050 и 1150 °С при вполне определенной степени деформации в результате протекания рекристаллизационных процессов происходит измельчение микроструктуры сплава ВТ23, имевшего в исходной заготовке крупнозернистую неоднородную микроструктуру.

4. Наиболее высокий уровень механических свойств был получен в результатековки с 1150 °С со степенью деформации 45–75%, что объясняется эффектом измельчения микроструктуры до $D = 250\text{--}400$ мкм сплава ВТ23 в поковке и разориентированным расположением более коротких пластин первичной α -фазы в β -превращенных зернах за счет более интенсивного проведения процесса деформации.

5. На основе методики установлены возможности термомеханического упрочнения поволоков из сплава ВТ23 в зависимости от их толщины.

Литература

1. Влияние режимов горячей деформации на структуру и характеристики разрушения сплава ВТ22 с пределом прочности выше 120 кгс/мм² // Л. В. Проходцева, В. Н. Моисеев, Б. А. Дроздовский и др. // Технология легких сплавов. 1980. № 8. С. 57.
2. Шаханова Г. В., Бухарина Н. В. К методике металлографического анализа ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов // Технология легких сплавов. 1984. № 6. С. 41–42.
3. Оптимизация структуры и механических свойств крупногабаритных штамповок из сплава ВТ23 / В. С. Соколов, О. В. Панфилов, В. С. Шибанов и др. // Технология: Оборудование, материалы, процессы. 1988. № 3. С. 64–69.
4. Родионов В. Л., Ишункина Т. В., Долгов В. В. Взаимосвязь структуры и механических свойств полуфабрикатов из сплава ВТ23 // Технология легких сплавов. 1987. № 6. С. 31.
5. Смирнов О. М. Получение крупногабаритных изделий из титановых сплавов с использованием кузнечной протяжки // Технология легких сплавов. 1989. № 6. С. 41–45.
6. Аношкин Н. Ф., Макрушин А. Л. Повышение качества и надежности заготовок из титановых сплавов // Технология легких сплавов. 1989. № 5. С. 5–11.
7. Зверев В. М. Исследование скорости роста усталостной трещины в плитах из сплава ВТ23 // Вопросы авиационной науки и техники: Технология легких сплавов. 1989. № 10. С. 14.
8. Бокштейн С. З. Термоциклическая обработка-резерв повышения служебных свойств титановых сплавов // Авиационная промышленность. 1989. № 8. С. 62–65.
9. Федуров В. Н. Исследование структуры и свойств фасонных поволоков из сплава ВТ23, полученных деформированием с температуры 1150 °С // Авиационная промышленность. 1992. № 5. С. 42–44.
10. Томсинский В. С. Исследование закономерностей фазовых превращений при нагреве закаленных сплавов титана // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1977. № 5. С. 123–128.
11. Егоров Е. Б., Шоршоров М. Х. Влияние термомеханической обработки на трещиностойкость титановых сплавов // МиТОМ. 1990. № 5. С. 49–50.