



Influence of temperature interval of forging with start of deformation from $(\alpha + \beta)$ - and β -fields and of conditions of cooling after deformation on structure and mechanical characteristics of forged pieces of alloy BT23 is shown.

В. Н. ФЕДУЛОВ, БНТУ

УДК 621.74

УСЛОВИЯ КОВКИ И УРОВЕНЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПО СЕЧЕНИЮ ПОКОВОК ИЗ СПЛАВА ВТ23 ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕМ ТЕРМИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ

Изготовление поковок из сплава ВТ23 ($t_{п.п.} = 920^\circ\text{C}$) размерами $100 \times 200 \times 300$ мм производили из круга диаметром 200 мм, длиной 490 мм, осадкой на 50% по размеру 490 мм и последующей протяжкой до нужных размеров ($\epsilon = 40\text{--}50\%$) на молоте с массой падающих частей 3000 кг. Время выдержки при нагреве заготовок в печи под ковку при температурах 900, 950, 1050, 1150 и 1250°C составляло 1 ч. При изготовлении поковок на одном и том же молоте повышение температуры начала ковки сначала на 50, 150, 250°C , а затем на 350°C выше 900°C (первый случай ковки) приводило к повышению интенсивности деформации, т. е. скорость деформации постоянно нарастала.

При проведении ковки из β -области большое внимание уделяли температуре окончания деформации [1]. Снижение температуры окончания деформации до температуры, близкой к $t_{п.п.}$, по данным [2], подавляет процесс спонтанной рекристаллизации металла при охлаждении поковок на воздухе после завершения деформации (в данном случае $v_{охл.} = 20\text{--}40^\circ\text{C}/\text{мин}$). Протекание спонтанной рекристаллизации после завершения процесса деформации эффективно [2] в случае титановых сплавов тогда, когда деформация в β -области является предварительной и заканчивается на $200\text{--}400^\circ\text{C}$ выше температуры полиморфного превращения. По нашему мнению, процесс спонтанной рекристаллизации при более низких температурах в случае, когда деформация является окончательной, т. е. как заключительный этап деформации, не желателен из-за одновременного протекания процессов охрупчивания границ формирующихся β -зерен и межфазных границ, что ведет к снижению механических свойств титановых сплавов, легированных алюминием в значительных количествах [3]. Поэтому при повышении температуры

начала деформации от 900 до 950°C , а особенно 1050 , 1150 и 1250°C одновременно старались уменьшить, по возможности, скорость деформации за счет снижения энергии удара молота, соответственно изменяя высоту подъема падающих частей при ковке в момент удара, чтобы приблизить температуру окончания деформации в последних трех случаях к значениям $t_{п.п.}$. Желаемого результата добились при проведении ковки с температур 1050 и 1150°C , когда температура окончания деформации была около 880 и 900°C соответственно. При ковке с температуры 1250°C деформацию удалось закончить лишь при температуре около 960°C . Выбранная схема деформации с температуры 1150°C , по-видимому, обеспечивала более равномерное протекание динамической рекристаллизации во всех зонах поковки во время собственно ковки и спонтанной рекристаллизации металла во время между ударами молота. Для чистоты эксперимента следует также учесть тот факт, что исходная структура заготовок сплава ВТ23 была крупнозернистой и практически нерекристаллизованной, что вело к интенсивному процессу статической рекристаллизации зерен уже во время нагрева заготовок под деформацию при температуре 900°C и особенно $950\text{--}1250^\circ\text{C}$.

При деформации в интервале температур $900\text{--}820^\circ\text{C}$ и последующем охлаждении на воздухе структура сплава в любом взятом объеме поковки неоднородна (размер микроструктуры оценить практически невозможно) и фактически некриссталлизованна (рис. 1). Это связано, как уже отмечалось, с неоднородностью структуры исходной заготовки и с тем, что деформация $(\alpha + \beta)$ -титановых сплавов при температурах ниже $t_{п.п.}$ весьма неравномерна по сечению поковок, а наличие α -фазы сдерживает протекание процессов рекристаллизации. В сере-

дине поковки микроструктура мало отличается от наружных слоев: β -зерна более правильной формы, что можно объяснить более медленным охлаждением в процессековки и после ее завершения. По всему сечению поковки β -зерна имеют прерывистую оторочку из α -фазы толщиной ≈ 1 – 2 мкм. Морфология α -фазы в β -зернах представляет собой хаотически расположенные тонкие ($\approx 0,5$ – $1,5$ мкм) пластины или пачки пластин. Четко выраженные колонии α -пластин отсутствуют. Фазовый состав сплава BT23 представлен только α - и β -фазами

($a_{\beta} = 0,321$ нм). Механические свойства сплава BT23 поволоков, полученных ковкой в интервале температур 900 – 820 °C, достаточно высоки: в наружных слоях $\sigma_{\beta} = 1130$ – 1150 МПа, $\delta = 8$ – 12% , $\psi = 21$ – 32% , КСУ = $0,36$ МДж/м², КСТ = $0,20$ МДж/м²; в середине $\sigma_{\beta} = 1100$ – 1120 МПа, $\delta = 10$ – 12% , $\psi = 25$ – 32% , КСУ = $0,35$ МДж/м², КСТ = $0,18$ МДж/м². Различия в значениях σ_{β} , ψ и КСТ в наружных слоях и середине поковки объясняются описанными отличиями в зеренной структуре сплава.

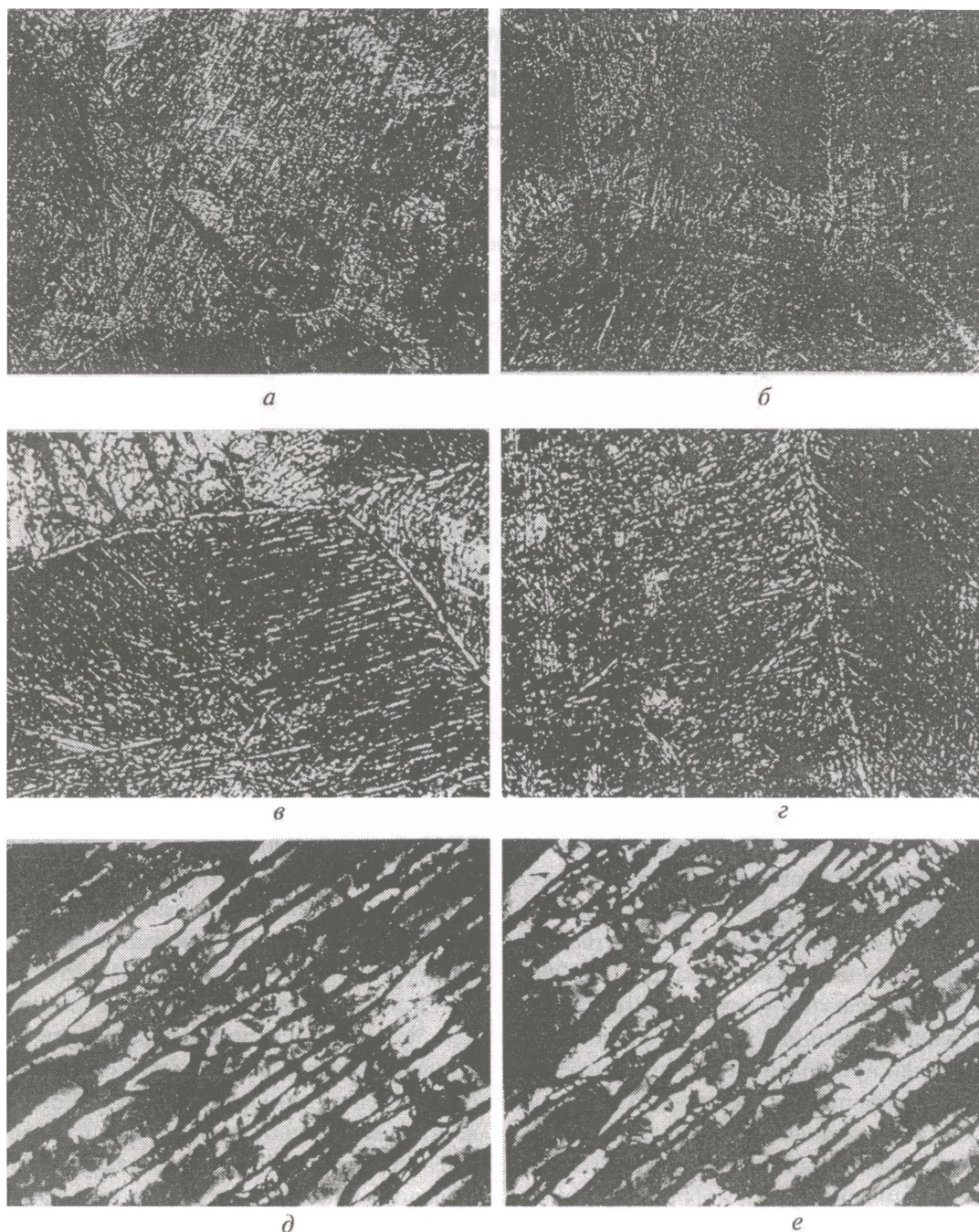


Рис. 1. Наиболее типичная микроструктура сплава BT23 поковки размерами $100 \times 200 \times 300$ мм, полученной ковкой в интервале 900 – 820 °C (охлаждение послековки на воздухе): а, в, д – наружные слои; б, г, е – середина. а, б – $\times 200$; в, г – $\times 500$; д, е – $\times 20000$

Охлаждение поковки, деформированной в интервале температур 900–820 °С, в воде (в наружных слоях $v_{\text{охл.}} = 7 \text{ }^\circ\text{C /c}$, в середине $v_{\text{охл.}} = 1 \text{ }^\circ\text{C /c}$) приводит к значительному повышению прочности сплава ВТ23 и особенно в наружных слоях: наружные слои – $\sigma_{\text{в}} = 1540\text{--}1550 \text{ МПа}$, $\delta = 2\text{--}4\%$, $\psi = 6\text{--}8\%$, $\text{КСУ} = 0,05\text{--}0,12 \text{ МДж/м}^2$, $\text{КСТ} = 0,02\text{--}0,07 \text{ МДж/м}^2$; середина – $\sigma_{\text{в}} = 1190 \text{ МПа}$, $\delta = 8\text{--}12\%$, $\psi = 20\text{--}24\%$, $\text{КСУ} = 0,33\text{--}0,38 \text{ МДж/м}^2$, $\text{КСТ} = 0,21 \text{ МДж/м}^2$. Микроструктура сплава ВТ23 в середине поковки, охлажденной в воде (рис. 2), мало отличается от

структуры сплава ВТ23 поковки, охлажденной на воздухе. Поэтому более высокие уровни здесь значений $\sigma_{\text{в}}$ и КСТ можно объяснить, по-видимому, наличием более развитой субзеренной структуры и более мелкими пластинами α -фазы, а также большим количеством мелкодисперсной α -фазы (толщиной $\approx 0,1\text{--}1,0 \text{ мкм}$) в β -прослойке, образовавшейся при охлаждении со скоростью $1 \text{ }^\circ\text{C/c}$ по сравнению с $0,2 \text{ }^\circ\text{C/c}$ при охлаждении на воздухе. Фазовый состав сплава в середине поковки представлен α - и $\beta_{\text{м}}$ -фазами ($a_{\beta} = 0,322 \text{ нм}$). Развитая субзеренная струк-

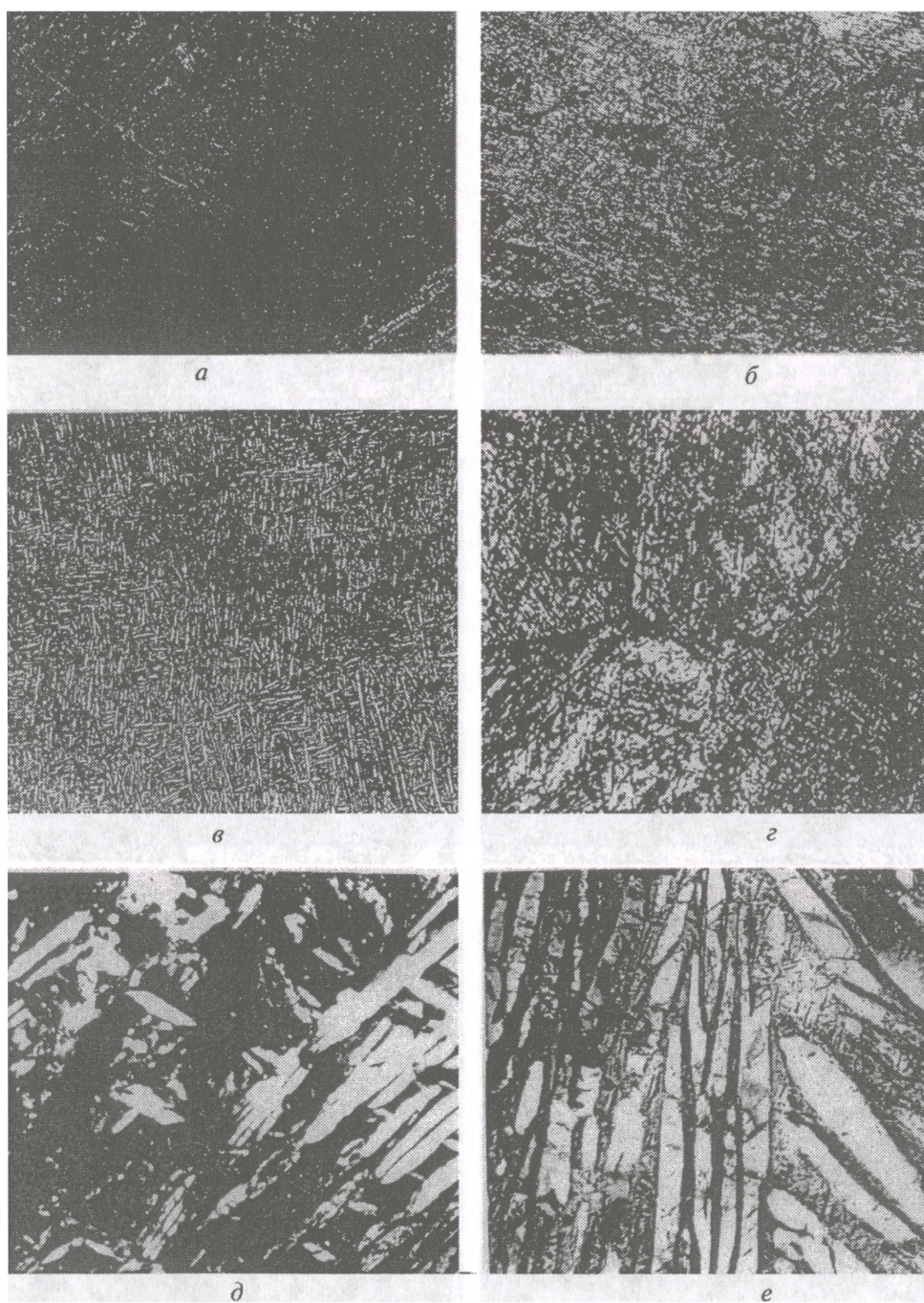


Рис. 2. Типичная микроструктура сплава ВТ23 поковки размерами 100×200×300 мм, полученной ковкой в интервале 900–820 °С (охлаждение послековки в воде): а, в, д – наружные слои; б, г, е – середина. а, б – ×200; в, г – ×500; д – ×20000; е – ×10000

тура, наличие значительного количества дефектов структуры и весьма мелких (толщина менее 0,1 мкм) частиц низкотемпературной α -фазы в сплаве ВТ23 наружных слоев поковки после охлаждения в воде, по всей видимости, позволили получить очень высокую прочность образцов. Фазовый состав сплава в наружных слоях представлен α -, α'' - и β_M -фазами ($a_\beta = 0,3225$ нм).

Нагрев исходных заготовок плиты из сплава ВТ23 и последующая ковка в интервале температур 950–860 °С с охлаждением на воздухе привели

к получению более однородной по сравнению с деформацией с 900 °С частично рекристаллизованной структуры, размер β -зерен в которой также оценить весьма затруднительно (рис. 3, а, б). В середине поковки при этом β -зерна имеют более правильную форму по сравнению с наружными слоями. β -Зерна во всем объеме поковки оторочены α -фазой (толщина 1,5–2,5 мкм). Внутриверенная структура (рис. 3, в, г) является «промежуточной»: наряду с хаотическим расположением α -пластин толщиной 0,5–2,0 мкм появляются «задатки»

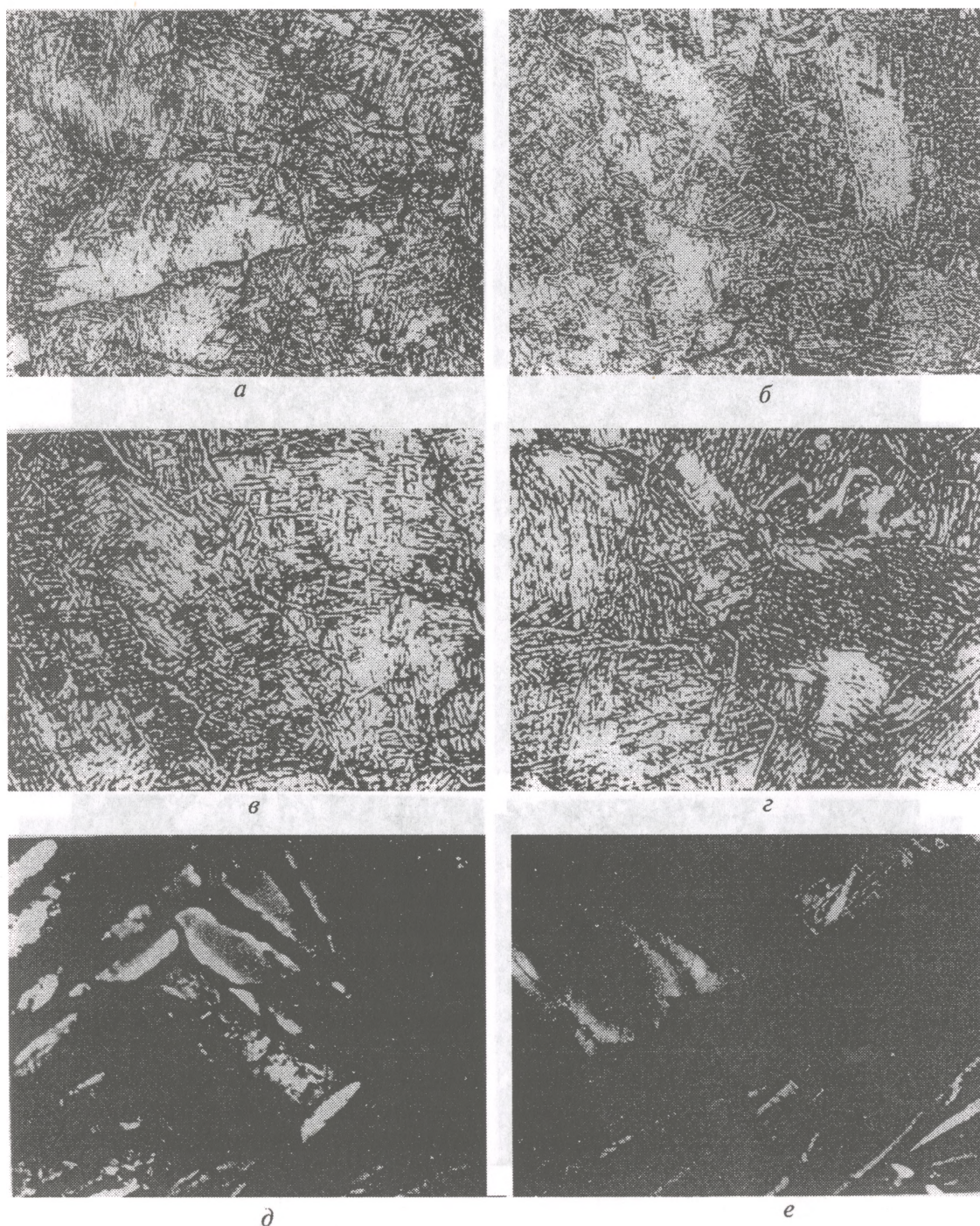


Рис. 3. Типичная микроструктура сплава ВТ23 поковки размерами 100×200×300 мм, полученной ковкой в интервале 950–860 °С (охлаждение послековки на воздухе): а, в, д – наружные слои; б, г, е – середина. а, б – ×200; в, г – ×500; д, е – ×20000

образования колоний (пачек) α -пластин, имеющих одинаковую ориентировку. Пластины α -фазы фрагментированы дислокациями и дислокационными стенками (рис. 3, *d*, *e*). Фазовый состав сплава VT23 представлен α - и β_m -фазами ($a_\beta = 0,321$ нм). В отдельных участках β -фазы видны выделения α -фазы размерами около 0,1 мкм, образовавшиеся в результате охлаждения поковки после деформации на воздухе. Механические свойства в данном случае характеризуются следующими значениями: наружные слои – $\sigma_b = 1110\text{--}1130$ МПа, $\delta = 8\text{--}10\%$, $\psi = 25\text{--}33\%$, КСУ = 0,41–0,47 МДж/м², КСТ = 0,18–0,21 МДж/м²; середина – $\sigma_b = 1080\text{--}1100$ МПа, $\delta = 10\text{--}12\%$, $\psi = 30\text{--}35\%$, КСУ = 0,41–0,45 МДж/м², КСТ = 0,18–0,20 МДж/м². Более высокие значения ψ и КСУ по сравнению с деформацией в интервале 900–820 °С можно объяснить измельчением β -зерна и некоторым повышением однородности внутризеренной структуры.

Повышение температуры начала ковки до 1050 °С (окончание при температуре около 880 °С), во-первых, способствует протеканию рекристаллизационных процессов в структуре сплава VT23 в результате деформации и последующего охлаждения

поковки, что обеспечивает измельчение β -зеренной структуры в наружных слоях ($D = 250\text{--}500$ мкм) и в меньшей степени в середине ($D = 300\text{--}800$ мкм) и совершенствованию формы β -зерен (рис.4). При этом β -зерна оторочены прослойкой α -фазы толщиной 2–3 мкм. Во-вторых, внутризеренная структура характеризуется наличием определенно ориентированных пачек длинных α -пластин, толщина которых составляет 0,5–2,5 мкм, наряду со значительным количеством более коротких и неориентированных определенным образом α -пластин. Наличие в структуре сплава VT23 пачек α -пластин приводит к заметному снижению значений ψ и КСУ, особенно в середине поковки, по сравнению с деформацией в интервале 950–860 °С: наружные слои – $\sigma_b = 1130$ МПа, $\delta = 10\%$, $\psi = 25\text{--}29\%$, КСУ = 0,43 МДж/м², КСТ = 0,19 МДж/м²; в середине – $\sigma_b = 1105$ МПа, $\delta = 10\%$, $\psi = 20\text{--}25\%$, КСУ = 0,37 МДж/м², КСТ = 0,16 МДж/м². Фазовый состав сплава VT23 здесь также представлен α - и β_m -фазами ($a_\beta = 0,3210$ нм).

Более интенсивное протекание процесса деформации поволоков из сплава VT23 в интервале температур 1150–900 °С и последующее охлажде-

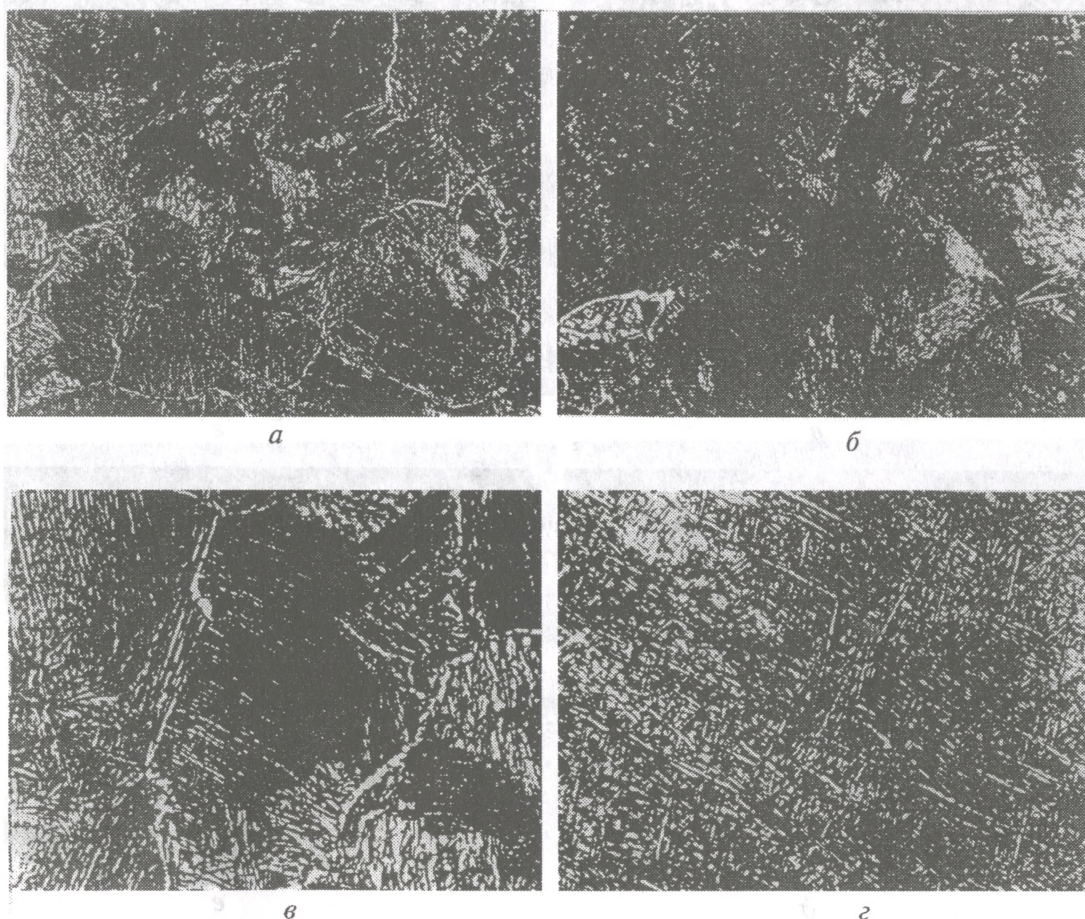


Рис. 4. Типичная микроструктура сплава VT23 поковки размерами 100×200×300 мм, полученной ковкой в интервале 1050–880 °С (охлаждение после ковки на воздухе): *a*, *в* – наружные слои; *б*, *г* – середина. *a*, *б* – ×200; *в*, *г* – ×500

ние на воздухе обеспечивают (рис. 5) измельчение β -зеренной структуры сплава и в наружных слоях, и в середине ($D = 150\text{--}450\ \mu\text{м}$), что по сравнению с деформацией с температуры $1050\ ^\circ\text{C}$ повышает значения характеристик пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости, особенно в середине поковки: наружные слои – $\sigma_B = 1120\text{--}1140\ \text{МПа}$, $\delta = 10\text{--}12\%$, $\psi = 29\text{--}35\%$, $\text{КСУ} = 0,50\text{--}0,54\ \text{МДж/м}^2$, $\text{КСТ} = 0,18\text{--}0,23\ \text{МДж/м}^2$; в середине – $\sigma_B = 1080\text{--}1100\ \text{МПа}$, $\delta = 12\text{--}14\%$, $\psi = 37\text{--}42\%$, $\text{КСУ} =$

$0,52\text{--}0,55\ \text{МДж/м}^2$, $\text{КСТ} = 0,22\text{--}0,26\ \text{МДж/м}^2$. Более высокие значения σ_B в наружных слоях по сравнению с серединой, как и при ковке с температур $900\text{--}1050\ ^\circ\text{C}$, объясняются наличием мелкодисперсной α -фазы ($\approx 0,1\text{--}0,5\ \mu\text{м}$) в β -фазе, образование которой произошло при охлаждении поковки на воздухе после деформации из-за более благоприятных условий для течения этого процесса в наружных слоях поковки. Основная масса пластин α -фазы разориентирована по отношению

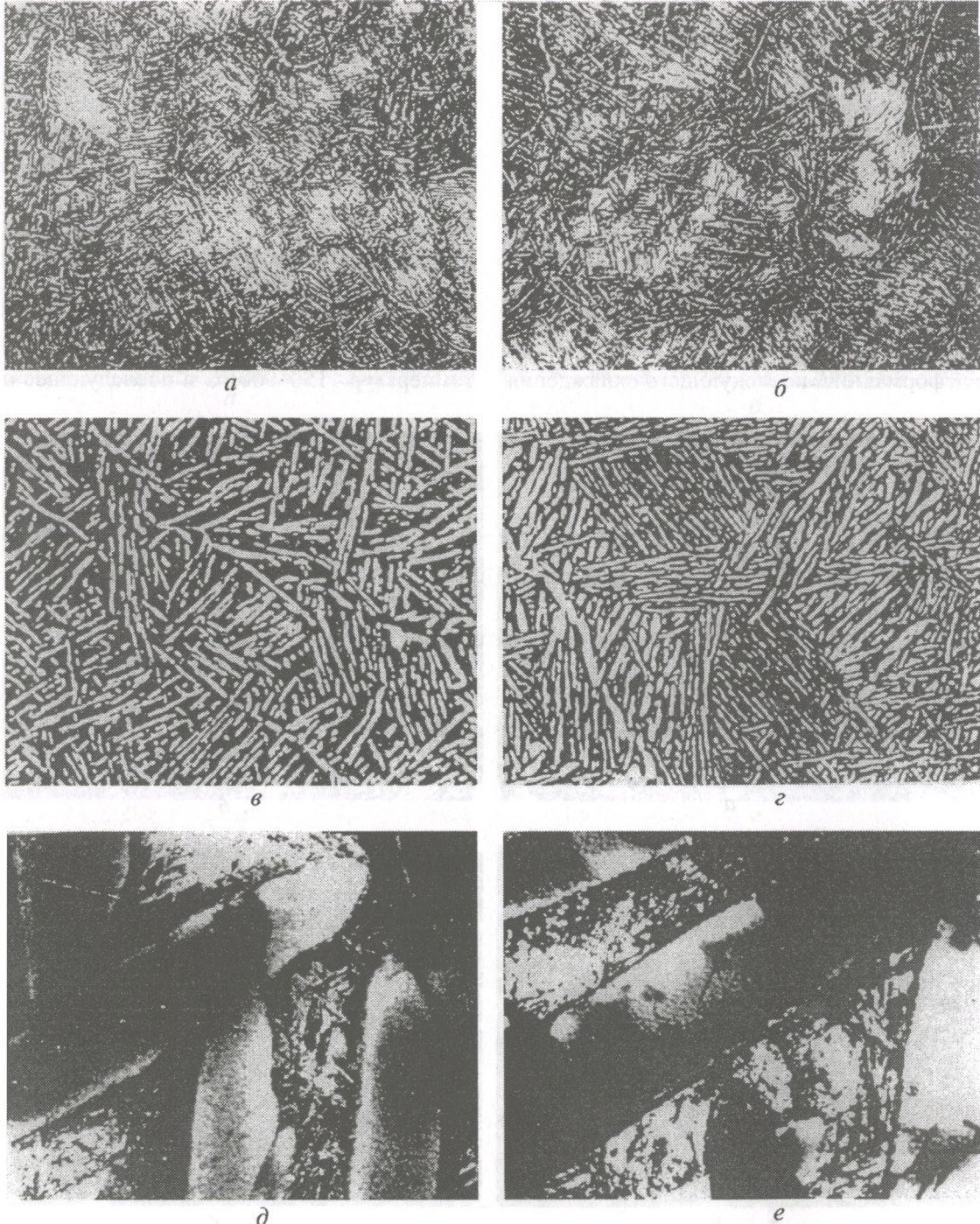


Рис. 5. Типичная микроструктура сплава ВТ23 поковки размерами $100\times 200\times 300\ \text{мм}$, полученной ковкой в интервале $1150\text{--}900\ ^\circ\text{C}$ (охлаждение послековки на воздухе): а, в, д – наружные слои; б, г, е – середина. а, б – $\times 200$; в, г – $\times 500$; д, е – $\times 20000$

друг к другу, имеет толщину около 0,5–2,5 мкм и более короткую длину, чем послековки с 1050 °С.

Слабое протекание собирательной рекристаллизации β-зерен после завершенияковки с 1150 °С при температуре около 900 °С в процессе последующего охлаждения на воздухе подтверждается тем случаем, когда охлаждение поковок после деформации производили в воде (рис. 6). Отличие структуры в данном случае состояло, во-первых, в том, что в наружных слоях поковки ($v_{\text{охл.}} =$

8,5 °С/с) β-зеренная структура (рис. 6, а) не выявлялась при обычном травлении, что свидетельствует об отсутствии α-оторочки по границам бывших β-зерен, а в середине поковки ($v_{\text{охл.}} = 1 °С/с$) толщина α-оторочки составляла всего лишь около 0,5–1,0 мкм, в то время как при охлаждении на воздухе толщина α-оторочки была в пределах 2–3 мкм. Во-вторых, и в наружных слоях, и в середине поковки пластины α-фазы в пределах β-зерен располагались разориентированно и были более тон-

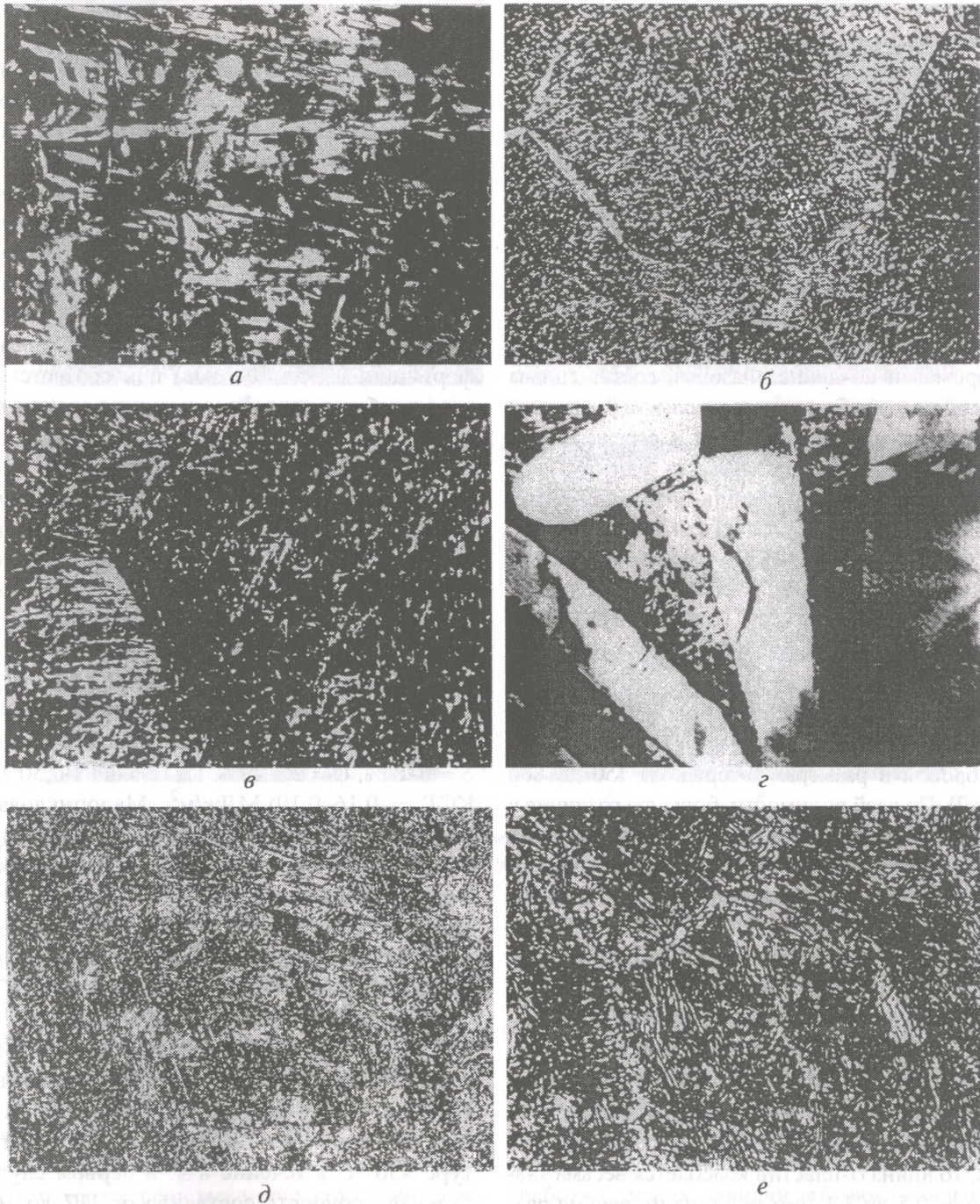


Рис. 6. Типичная микроструктура сплава ВТ23 поковки размерами 100×200×300 мм, полученной ковкой в интервале 1150–900 °С (а–г – охлаждение послековки в воде; д, е – охлаждение послековки: 5, 5 мин на воздухе, а далее в воде): а, д – наружные слои; б, в, г, е – середина. а, г – ×20000; б, д – ×200; в, е – × 5000

кими: наружные слои – около 0,1 мкм, середина – 0,5–1,0 мкм. В связи с этими отличиями в структуре сплава прочностные характеристики были более высокими: в наружных слоях образцы разрушались хрупко, в середине – $\sigma_b = 1180\text{--}1200$ МПа, $\delta = 8\text{--}10\%$, $\psi = 30\text{--}35\%$, КСУ = 0,23–0,26 МДж/м², КСТ = 0,10–0,13 МДж/м². Фазовый состав сплава ВТ23 в наружных слоях был представлен мартенситом α' -, α - и β_m -фазами ($a_\beta = 0,3225$ нм).

Рост α -оторочки и α -пластин после завершения процессаковки в интервале 1150–900 °С и охлаждения на воздухе, по-видимому, шел в течение всего процесса охлаждения (до 550 °С). Так, в результате эксперимента, когда послековки в интервале 1150–900 °С поковку сначала охлаждали на воздухе в течение 5 мин, а далее в воде, сформировавшаяся микроструктура сплава ВТ23 (рис. 6, д, е) отличалась от микроструктуры сплава ВТ23 поковки, охлажденной только на воздухе, более тонкой α -оторочкой (≈ 1 мкм) по границам β -зерен и полным отсутствием колоний или пачек α -пластин, которые были расположены неориентировано, имели толщину около 0,3–0,5 мкм в наружных слоях и 0,5–1,0 мкм в середине и были более короткими по длине. Фазовый состав сплава ВТ23 в этой поковке был представлен α - и β_m -фазами (в наружных слоях $a_\beta = 0,322$ нм, в середине $a_\beta = 0,3215$ нм). Механические свойства сплава ВТ23 в данном случае имели следующие значения: наружные слои – $\sigma_b = 1305\text{--}1350$ МПа, $\delta = 3\text{--}4\%$, $\psi = 6\text{--}8\%$, КСУ = 0,08–0,15 МДж/м², КСТ = 0,04 МДж/м²; середина – $\sigma_b = 1160\text{--}1180$ МПа, $\delta = 6\text{--}8\%$, $\psi = 20\text{--}25\%$, КСУ = 0,23–0,30 МДж/м², КСТ = 0,07–0,09 МДж/м².

Для сплава ВТ23 у поковки, деформированной в температурном интервале 1250–960 °С и охлажденной послековки на воздухе, характерно наличие рекристаллизованной микроструктуры со значительным разбросом в размерах β -зерен: от 150 до 800 мкм (рис. 7). По всей видимости, большое различие в размерах зерен можно объяснить значительной неоднородностью протекания процесса динамической рекристаллизации во время деформации, а также возможностью осуществления в той или иной степени собирательной рекристаллизации при охлаждении поковки на воздухе после завершенияковки (960 °С), особенно в середине поковки. Однако β -зерна неравноосные, оторочены α -прослойкой толщиной около 2,5–3,5 мкм. Для внутреннего строения характерно не присутствие колоний или пачек α -пластин, а их неориентированное относительно друг друга расположение. Толщина α -пластин колеблется весьма значительно от 0,5 до 2,5 мкм, а длина их весьма различна (рис. 7, д, е). Механические свойства сплава ВТ23 для данной поковки из-за наличия разноразмерности в структуре характеризуются более низ-

кими по сравнению с деформацией с 1150 °С значениями δ , КСУ и КСТ: наружные слои – $\sigma_b = 1120\text{--}1135$ МПа, $\delta = 5\text{--}6\%$, $\psi = 29\text{--}32\%$, КСУ = 0,32–0,40 МДж/м², КСТ = 0,11–0,17 МДж/м²; середина – $\sigma_b = 1060\text{--}1080$ МПа, $\delta = 6\text{--}8\%$, $\psi = 38\text{--}42\%$, КСУ = 0,34–0,42 МДж/м², КСТ = 0,09–0,15 МДж/м².

Проведение старения образцов поковок по режиму нагрев при температуре 450 °С в течение 8 ч для случаев проведения деформации с охлаждением поковок послековки на воздухе позволило повысить прочность сплава ВТ23 на 30–60 МПа при снижении характеристик пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости (режимы деформаций 1, 3, 4, 5, 8). Для поковки, деформированной с 900 °С и охлажденной в воде после завершенияковки, характерно после проведения старения по тому же режиму повышение прочности сплава ВТ23 только в середине поковки примерно на 110 МПа. Для поковок с режимами деформации 6, 7 проводили старение при температуре 550 °С в течение 8 ч. Здесь характерно повышение прочности сплава и в наружных слоях (в режиме деформации 7 – 110 МПа), и в середине (в режиме деформации 6 – на 55 МПа, в режиме деформации 7 – на 70 МПа) при соответствующем, хотя и небольшом снижении характеристик пластичности (δ , ψ) и ударной вязкости (КСУ, КСТ) по сравнению с состоянием после деформации.

С точки зрения общего уровня механических свойств и их однородности по сечению поковки при указанном режиме упрочнения предпочтение следует отдать ковке в интервале температуры 900–820 °С с охлаждением на воздухе: $\sigma_b = 1150\text{--}1180$ МПа, $\delta = 8\text{--}10\%$, $\psi = 16\text{--}26\%$, КСУ = 0,29–0,32 МДж/м², КСТ = 0,12–0,16 МДж/м², а также ковке в интервале температуры 1150–900 °С с охлаждением на воздухе: $\sigma_b = 1155\text{--}1190$ МПа, $\delta = 6\text{--}8\%$, $\psi = 22\text{--}29\%$, КСУ = 0,46–0,50 МДж/м², КСТ = 0,16–0,19 МДж/м². Малоцикловая усталость при наличии острого кольцевого надреза однако выше у образцов сплава ВТ23 поковки, деформированной при 1150–900 °С: $N_{ср.} = 22\ 000$ циклов по сравнению с $N_{ср.} = 17\ 000$ циклов (ковка при 900–820 °С), по всей видимости, из-за различия во внутризеренном строении сплава ВТ23.

Определяли длительную прочность ($t_{исп.} = 450$ °С, $\sigma = 600$ МПа) образцов сплава ВТ23, вырезанных из поковок, деформированных в интервале 900–820, 1150–900, 1250–960 °С, охлажденных на воздухе и затем состаренных при температуре 450 °С в течение 8 ч: в первом случае длительная прочность составила от 117 до 169 ч, во втором – 252–282, в третьем – 142–193 ч.

Что касается ускоренного охлаждения поковок после деформации, несмотря на высокий уровень

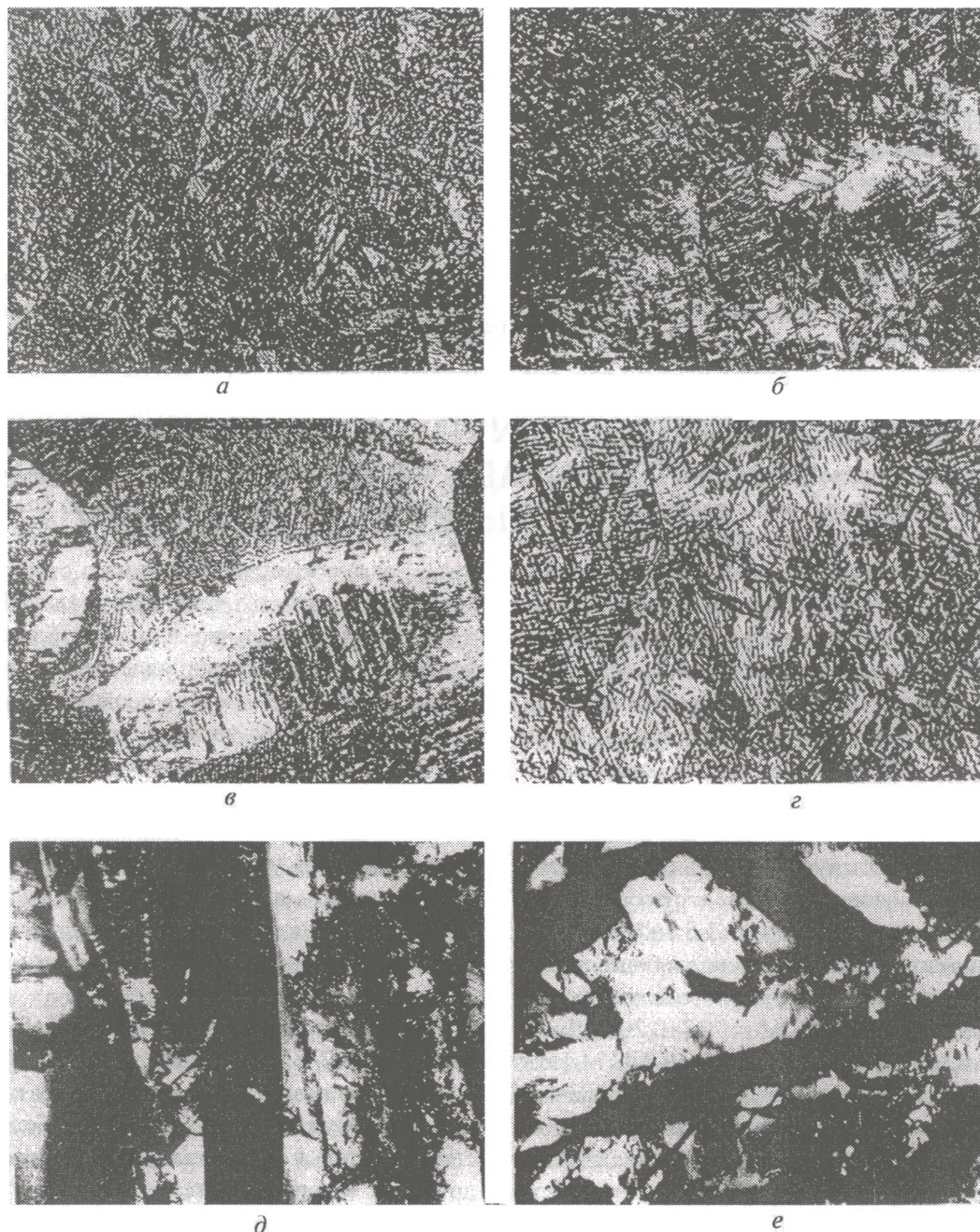


Рис. 7. Типичная микроструктура сплава ВТ23 поковки размерами 100×200×300 мм, полученной ковкой в интервале 1250–960 °С (охлаждение послековки на воздухе): а, б, в – наружные слои; г, д, е – середина. а, в – ×100; б, г – ×200; д, е – ×20000

прочности после старения, использование его в качестве элемента упрочнения для массивных изделий из сплава ВТ23 нежелательно из-за значительной разницы в структуре и прочности наружных слоев и середины: уже для поволоков толщиной 100 мм и массой около 30 кг имели $\Delta\sigma_{\text{в}} = 160\text{--}240$ МПа.

Исследовали влияние термического упрочнения: нагрев до температуры 760 °С, выдержка в течение 30 мин, охлаждение в воде + старение: 450 °С, 8 ч, на уровень механических свойств заготовок размерами 11×11×60 мм, вырезанных сразу послековки и охлаждения из наружных слоев и середины поволоков, деформированных по режимам

1, 2, 3, 4, 5, 6, 8. Таким образом, оценивали способность горячедеформированного сплава ВТ23 с различной сформировавшейся структурой к упрочнению в равных условиях проведения термической обработки на уровень $\sigma_{\text{в}} > 1280$ МПа (130 кгс/мм²) и сохранению при этом удовлетворительных значений характеристик пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости. После проведения указанного выше упрочняющего режима термической обработки, режим закалки которого с нагревом при 760 °С и охлаждением в воде был выбран из-за соображений наименьшего воздействия на сформировавшуюся при ковке структуру и получения доста-

точного эффекта упрочнения при последующем старении, добились в случаях предшествующей деформации по режимам 1, 2, 3, 4, 5, 6 примерно одинакового эффекта упрочнения образцов сплава ВТ23: из наружных слоев поковки – $\sigma_b = 1335\text{--}1345$ МПа, из середины поковки – $\sigma_b = 1305\text{--}1320$ МПа. Разницу в уровне упрочнения образцов сплава, вырезанных ранее из наружных слоев и в середине поковки, $\Delta\sigma_b = 25\text{--}30$ МПа, следует объяснить за счет более крупного (хотя и незначительно) β -превращенного зерна сплава в середине поковки по отношению к ее наружным слоям и несколько худшей проработкой здесь структуры в процессековки. Вырезанные образцы сплава ВТ23 у поковки, деформированной в интервале температур $1250\text{--}960$ °С, в результате проведения упрочняющей термической обработки показали несколько меньшие значения прочности: наружные слои – $\sigma_b = 1290$ МПа, середина – $\sigma_b = 1275$ МПа, что обеспечивается, по всей видимости, более значительной разнотекстурностью горячедеформированного сплава и наличием более значительной ($\approx 3,5$ мкм) α -оторочки по границам β -зерен [4, 5]. Для случаев деформации по режимам 1, 2, 3, 4, 5, 6 механические свойства образцов имели основные отличия после проведения упрочняющей термической обработки в значениях ψ , КСУ и КСТ. В тех случаях, когда имели в исходном состоянии (послековки) структуры более тонкие пластины α -фазы ($\approx 0,5\text{--}1,5$ мкм, режимы 1, 2, 6), получили после упрочнения и более низкие значения $\psi = 8\text{--}13\%$ вместо $\psi = 11\text{--}16\%$ при толщине пластин $0,5\text{--}2,5$ мкм, КСУ = $0,17\text{--}0,20$ МДж/м² вместо $0,25\text{--}0,30$ МДж/м² и КСТ = $0,07\text{--}0,08$ МДж/м² вместо $0,12\text{--}0,17$ МДж/м². Для внутризеренной структуры с более тонкими пластинами α -фазы характерна также и более тонкая прослойка β -фазы, образование в которой после упрочнения при старении на уровень $\sigma_b > 1280$ МПа дисперсной α -фазы ($\approx 0,1$ мкм) в значительной степени более интенсивно снижало, на наш взгляд, значения ψ и особенно КСУ и КСТ по сравнению с внутризеренной структурой, у которой толщина пластин α -фазы послековки, а значит и толщина β -прослойки, составляла примерно $1,5\text{--}2,5$ мкм. Это связано с тем, что чем

тоньше β -прослойка, тем более дисперсное и в то же время более неоднородное выделение здесь частиц дисперсной α -фазы при старении.

Для случая поковки, полученной деформацией с 1250 °С, более низкие значения $\delta = 2\text{--}4\%$ и $\psi = 9\text{--}11,5\%$ у термоупрочненных образцов по сравнению с механическими свойствами образцов поковки, полученных деформированием по режимам 3,4,5, получили также из-за наличия более грубой α -оторочки по границам β -зерен. Одновременно значения КСУ и КСТ были примерно те же: КСУ = $0,24\text{--}0,27$ МДж/м², КСТ = $0,08\text{--}0,12$ МДж/м².

Выводы

1. Показано влияние температурного интервалаковки с началом деформации из ($\alpha+\beta$)- и β -области и условий охлаждения (воздух, воздух – вода, вода) после деформации на структуру и механические свойства повок из сплава ВТ23.

2. Установлено, что наиболее благоприятные условия для формирования высокого и однородного комплекса механических свойств образцов крупных повок после термического упрочнения достигаются в результате ихковки в интервале $1150\text{--}900$ °С и последующего охлаждения на воздухе;

3. Предложена методика оценки способности к термическому упрочнению всего полуфабриката из титанового сплава сравнением механических свойств образцов, вырезанных из различных по сечению зон и прошедших затем термическую обработку в равных условиях.

4. При термическом упрочнении (760 °С, 30 мин, вода + 450 °С, 8 ч) в равных условиях образцы, вырезанные из повок сплава ВТ23, для всех случаевковки в наружных слоях обладают более высокой способностью к упрочнению по сравнению с серединой: σ_b в наружных слоях выше, чем в середине на $30\text{--}50$ МПа в зависимости от температурного интервала деформации. Этот эффект определяется более мелкозернистой микроструктурой сплава ВТ23 в наружных слоях по сравнению с серединой, а также тем, что в наружных слоях внутризеренное строение сплава отличается большей разориентированностью α -пластин относительно друг друга.

Литература

1. Федуров В. Н. Механические свойства повок из сплава ВТ23, полученных деформированием из β -области // Авиационная пром-сть. 1991. № 7. С. 42–44.
2. О закономерностях формирования зеренной структуры титановых сплавов при горячей обработке / И. Б. Родина, Г. В. Шаханова, И. В. Левин и др. // Авиационная пром-сть. 1987. № 9. С. 50.
3. Попов А. А., Анисимова Л. И. Влияние алюминия на характер разрушения титановых сплавов // МиТОМ. 1984. № 12. С. 40.
4. О межзеренном разрушении в двухфазных титановых сплавах с пластинчатой структурой / Н. З. Перцовский, М. Я. Брун, Е. М. Голубева и др. // ФММ. 1988. Т. 65. Вып. 4. С. 816–822.
5. Бокштейн С. З., Зюлина Н. П., Маркович О. В. Диффузионные особенности внутренних поверхностей раздела в титановых сплавах // ФММ. 1989. Т. 68. Вып. 1. С. 104–109.