УДК 621.73

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОСАДКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ20

Галкин В.И., д.т.н., «МАИ» – Национальный исследовательский институт
121552, Москва: Волоколамское шоссе, д. 4; тел. +7 (495) 141-94-53; galkin@mati.ru
Головкин П.А., к.т.н., АО «Плутон»
105120, Россия, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д.11.
тел.: +7 (495) 730-36-19; p.golovkin@pluton.msk.ru

THE FEATURES OF DEFORMATION AT SINKING STRAIN OF BLANKS MADE FROM VT20 TITANIUM ALLOY

V. I. Galkin, Doctor in Engineering Science, MAI - National Research Institute
4, Volokolamskoe shosse, 121552 Moscow, Russian Federation;
Phone: +7 (495)141-94-53, galkin@mati.ru;
P. A. Golovkin, Ph.D. in Engineering Science, “Pluton” JSC
11, Nijnyaya Syromyatnicheskaya, 105120, Moscow, Russian Federation.
Phone: +7 (495) 730-36-19, p.golovkin@pluton.msk.ru

Аннотация

На примере особенностей осадки заготовок из титанового сплава ВТ20 анализируются роль механизмов деформации и других факторов на структуру и свойства материала поковок.

Ключевые слова: осадка, поковки, механизмы деформации, титановые сплавы, температура, перегрев, структурные и фазовые превращения, напряжённо-деформированное состояние, остаточные напряжения.

Annotation

The role of deformation mechanisms and other factors affecting the structure and properties of the forgings material is analyzed using as an example the features of sinking strain of blanks made from VT20 titanium alloy.

Key words: sinking strain, forgings, deformation mechanisms, titanium alloys, temperature, overheat, structural and phase changes, stress-strain state, residual stresses.

Общие положения. Механизмы деформации при осадке заготовок.

На примере осадки заготовок исходным размером Ø100×100 мм из псевдо-α титанового сплава ВТ20 [1] в статье рассмотрены роль и взаимовлияние механизмов горячей деформации. Моделирование осадки заготовок на гидравлическом аккумуляторном прессе усилием 50 МН производилось с использованием конечно-элементного продукта QForm [2].

При различных температурах, пластическая деформация происходит с преобладанием тех или иных механизмов, как-то: сдвигового (дислокационного), аморфно-диффузионного (атомного), а также путём межфазного перемещения через растворение и осаждение [3]. При температурах более 0,35 $T_{пл}$ атомный и дислокационный механизмы обычно объединяют термином внутризёренной деформации, а процессы рекристаллизации, растворения и осаждения в большей мере относят к деформации межзёренной [4…6].

Неоднородность пластического течения, обусловленная влиянием внешнего трения, природой и теплообменом материала заготовки с инструментом и окружающей средой, могут привести к дефектам в готовом изделии ввиду высоких остаточных напряжений и падения трещиностойкости, характерном для титановых сплавов [7]. Эта неоднородность приводит к разбиению заготовки на объёмы с преобладанием того или иного механизма и последующему взаимодействию этих объёмов. Так, при осадке заготовок со степенью Σ=20…30 % по всей высоте поковки преобладает сдвиг и разбиение зёрен, при $\Sigma \geq$ 30…40 % роль межзёренной деформации резко возрастает [8].

Внутризёренная деформация вызывает приращение напряжения, межзёренная – уменьшает напряжение течения соответственно условию Гиббса [4, 8]. В титановых сплавах эти механизмы дополняются активными фазовыми превращениями [9], поэтому в данном случае межзёренный деформационный механизм справедливо также назвать рекристаллизационным или рекристаллизационно–фазовым. Этот механизм вносит значительный вклад в деформацию титановых сплавов, поскольку переход $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ носит эндотермический характер, и локализация фазовых превращений тем больше, чем выше температура деформации и значительнее перепад температур в объёме поковки, и на поверхности раздела поковки и инструмента [5].

Структурные и фазовые превращения в материале заготовки при осадке

Быстрое охлаждение контактирующих с рабочей поверхностью инструмента слоёв материала заготовки затормаживает их течение, вызывает образование застойных приповерхностных зон. «Прилипшие» поверхностные слои увеличивают сдвиговые деформации во внутренних слоях поковки, усиливая их деформационный разогрев. Рост неравномерности происходит лавинообразно: с учётом эндотермии превращения $(\alpha\rightarrow\beta)$ [9], более податливая и пластичная β- фаза облегчает течение внутренних слоёв материала заготовки, ещё более локализуя их.

В результате формируются высокие внутренние напряжения термического и фазового происхождения, способные вызвать искажение формы готовых деталей и образование трещин в их материале [9, 10]. Величины температур и накопленных деформаций в материале опытных поковок, рассчитанные с применением программного продукта QForm, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры деформации опытных поковок из сплава ВТ20

Номер образца	Деформация при осадке, %	Нагрев под деформацию, ^{0}С	Температура материала поковки		Логарифмическая деформация, ед.	
			max	min	max	min
01	50	1000±10	1079	735	1,64	0,005
02	50	960±10	1060	694	1,66	0,007
03	65	1020±10	1120	749	2,06	0,011
04	70	1020±10	1096	742	2,78	0,17
07	75	1020±10	1112	1006	2,84	0,16
06	75	920±10	1012	675	2,71	0,20

Анализ представленных на рисунке 1 макрошлифов поковок показывает, что понижение температуры деформации действенно ограничивает развитие межзёренного механизма деформации: ограничивается рекристаллизационный рост зерна и развитие фазовых превращений типа (α→β), (α→α’), (α→α’→α’’), и других [5, 9].

Как следует из рисунка 1, в периферийных областях поковок деформация преимущественно внутризёренная с образованием обширных рекристаллизованных застойных зон самоотпуска, в то время как в центральных областях имеет место локализованная межзёренная деформация.

На рисунке 2 показаны типичные микроструктуры поковок, полученных с преобладанием При осадке с нагрева 920…940 ^{0}С, наблюдается превращение исходной глобулярной структуры прутка в более мелкую глобулярную (тип 1 и 2 по [11]), и далее в корзинчатую (тип 4). С нагревом до 960 ^{0}С, и далее до 1000 ^{0}С происходит обособление зёрен из корзинчатой структуры в мелкозернистую пластинчатую (типы 4, 7), и затем в крупнозернистую пластинчатую (тип 7), или округлую структуру (тип 7). Повышение температуры нагрева свыше 1000 ^{0}С, вызывает резкий (в разы) рост зерна (тип 7, 8 по [11]). Наконец, при нагреве до 1040 ^{0}С, в местах тройных стыков зёрен начинается зарождение и рост новых зёрен, имеющих энергетически выгодную шаровидную форму и игольчатую структуру α’ (тип 5).

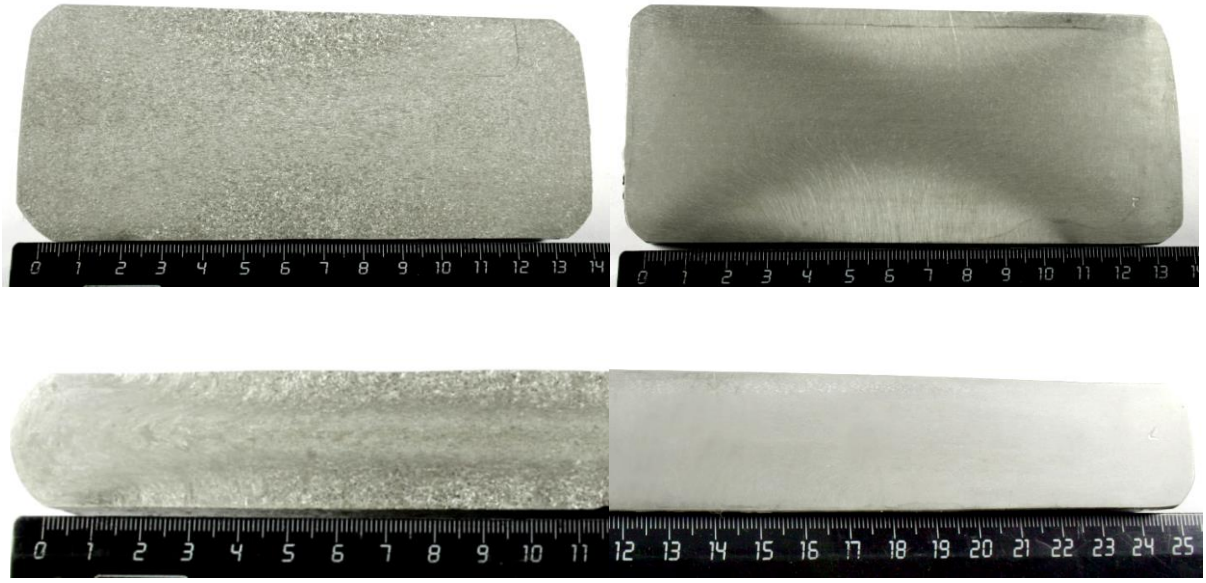

Рис. 1. Макроструктуры образцов №1, №2 (вверху) и №5 и №6 (внизу)

Это значит, что деформационный разогрев вызывает превращение пластинчатой α- фазы (6 тип) в менее трещиностойкую [7, 12] игольчатую (тип 7). Одновременно по границам растущих зёрен выделяются провоцирующие β- хрупкость прослойки фазы α’ [7, 12], поскольку границы зёрен являются областями с повышенным уровнем напряжений сжатия, а удельный объём α- титана на ≈ 0,17 % меньше, чем β- титана при 20 ^{0}C, и на ≈ 1,5…5 % меньше при 950…550 ^{0}C [9]. Это значит, что для получения равномерной мелкозернистой структуры типов 1, 2, 4 и 7 [11] температуру нагрева заготовок из сплава ВТ20 под ковку следует ограничивать величиной 960 ^{0}C.

В зонах локализованных деформаций поковок зёрна достигают 0,5 мм, что крупнее чем в исходных прутках, в то время как в наружных объёмах материал представлен микроскопической (α+β)- структурой 2 и 3 типа с величиной зерна 3…5 мкм (1 балл по [11]). Такой баланс превращений определяется тем, что температура рекристаллизации сплава ВТ20, лежащий в пределах 800…950 ^{0}C, существенно меньше температуры его полиморфного превращения (960… 1000 ^{0}C, [9]).

Поэтому при превышении свободной энергией некоего критического уровня, её оказывается достаточно для укрупнения зерна и даже зарождения и роста новых зёрен, но недостаточно для формирования совершенных фаз измельчённой структуры. Тогда в зонах локализованных деформаций формируются крупные зёрна сильно искажённых фаз пониженной плотности, у тройных стыков и по границам зёрен происходит выделение вызывающей β- хрупкость α’- фазы и её дальнейшая деградация [9].

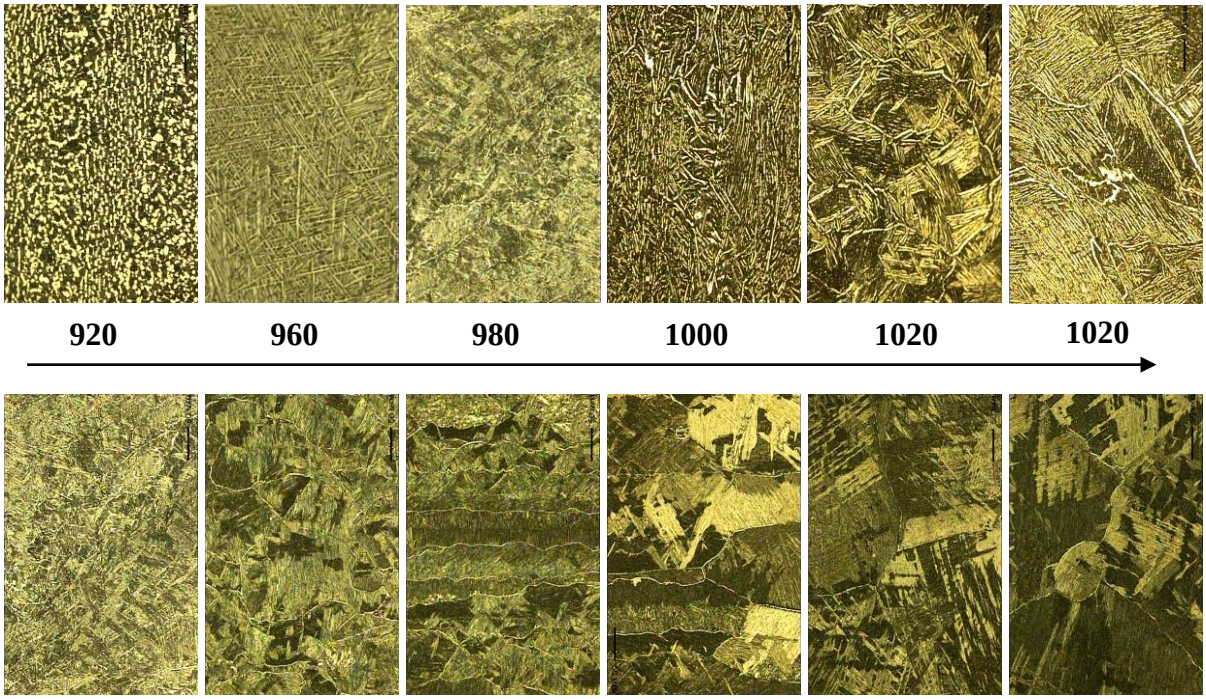

Рис. 2. Типичная микроструктура поковок, полученных с преобладанием внутризёренной (вверху) и межзёренной (внизу) деформации; ×200

Несоразмерность вновь образованных в зонах локализованных деформаций фаз с окружающей матрицей ухудшает трещиностойкость титановых сплавов, повышает внутренние напряжения [7]. Для получения качественной структуры поковки из сплава ВТ20, следует ограничить температуру нагрева перед деформацией в пределах 920…960 ^{0}С (против 970…1010 ^{0}С на молоте, 970…1000 ^{0}С на прессе [1]).

Это означает целесообразность ковки сплава в (α+β)– состоянии, при условии подавления локализованных деформаций и разбиения застойных зон, где могут сформироваться крупные зёрна с искажёнными фазами. Для этого следует перемещать очаг деформации и не допускать локальный разогрев, либо охлаждение материала заготовки, например, применяя осадку в вогнуто-выпуклых конических бойках [10].

Большая теплопередача и малая теплопроводность титановых сплавов, а также значительная (2835,4 Дж/моль) эндотермия перехода (α+β)→β в титане [9] вызывает быстрое охлаждение прилегающих к инструменту областей заготовок и обособление процесса деформации в их центральных областях, что отражено на рисунке 4. Очевидно, что чем больше градиент температур на поверхности раздела поковка-инструмент, и чем дольше их соприкосновение, тем сильнее налипание на инструмент материала заготовки и менее равномерен деформационный процесс.

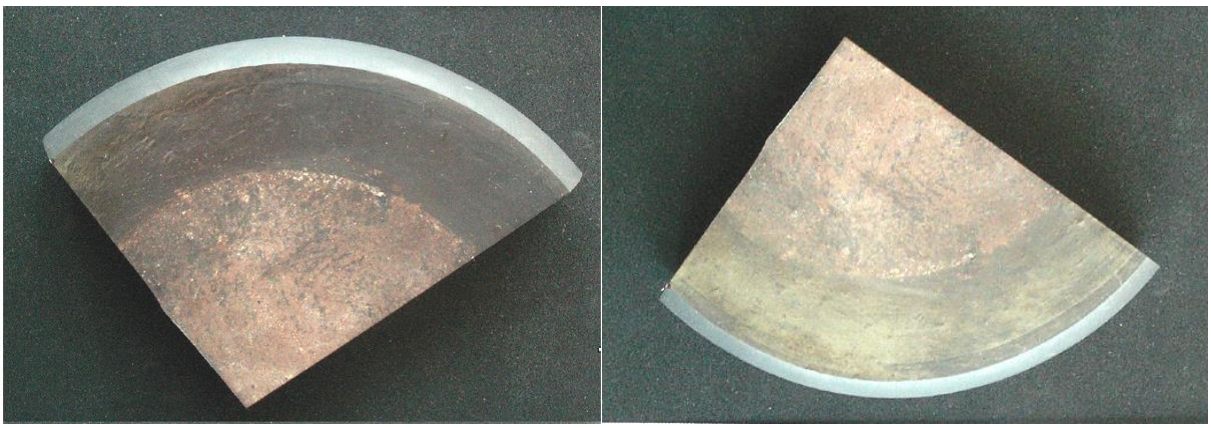

Рис. 3. Отпечаток от нижнего (слева) и верхнего (справа) бойков при осадке заготовки на молоте с температуры 1000 ^{0}С

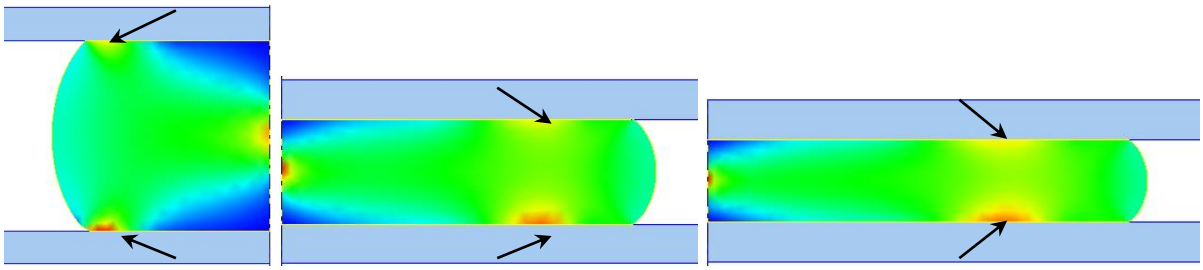

Рис. 4. Торцевые зоны торможения при осадке на 53 (а), 64 (б) и 84 (в) %.

Измерение твёрдости материала поковок показало её колебание НВ 267…331 НВ, то есть ≈24 % от минимального значения. Исходя из того, что для титановых сплавов НВ = 42,95 + 2,51$\sigma_{0,2}$ [12], разброс прочности материала поковки составил 262 МПа (≈22,4 %) при максимальном значении 1178 МПа. При этом большая твёрдость наблюдалась в зонах с меньшей температурой. Такой разброс показывает уровень внутренних напряжений более 20 % от расчётной прочности материала поковок.

Разница в продолжительности соприкосновения заготовки с нижним бойком, на который она уложена, и опускающимся верхним бойком, вызывает отклонение зоны равновесной деформации от высотной плоскости симметрии в пределах 7…15 % от высоты поковки. Это отклонение тем больше, чем выше разница температур поковки и инструмента. Охлаждение поверхностных слоёв заготовки вызывает их «прилипание» к инструменту, усиливает сдвиговые деформации в срединных слоях поковки и их разогрев, повышая уровень внутренних напряжений.

При осадке заготовок на 75 % переворот их после осадки на 50 % в плоских бойках, позволяет на 5…13 ^{0}С уменьшить деформационный разогрев, и на 30…33 ^{0}С ограничить охлаждение материала поковки. Величины накопленных деформаций и температур при осадке заготовок с переворотом и без него приведены в таблице 2.

Таблица 2

Деформации и температуры при осадке с переворотом и без него

Нагрев, ^{0}С	900	910	920	940	960	980	1000	1020	1040
Осадка в плоско–параллельных бойках без переворота заготовки									
Деформация, логар. единиц	2,48…0,10	2,52…0,09	2,48…0,09	2,49…0,09	2,45…0,08	2,47…0,08	2,41…0,07	2,42…0,07	2,39…0,07
Температура заготовки, ^{0}С	1046…667	1051…674	1053…676	1064…691	1073…703	1085…715	1094…727	1107…740	1119…752
Осадка в плоско–параллельных бойках с переворотом заготовки									
Деформация, логар. единиц	2,38…0,11	2,38…0,10	2,33…0,10	2,30…0,09	2,26…0,09	2,29…0,09	2,30…0,09	2,29…0,09	2,34…0,08
Температура заготовки, ^{0}С	1033…701	1038…706	1041…712	1053…724	1062…734	1075…745	1087…757	1101…767	1114…780

Выводы

1. Большой коэффициент теплопередачи при малой теплопроводности титановых сплавовё, предопределяют локализацию деформационных и связанных с ними процессов при ковке и штамповке. Эта неравномерность тем больше, чем выше температура заготовки и дольше её контакт с инструментом. Так, колебание твёрдости материала поковки составляет до четверти от минимального значения, а уровень внутренних напряжений превышает 20 % от минимальной расчётной прочности.

2. Существует множество простых способов понижения неравномерности деформационных процессов. Так, осадку заготовок следует проводить в погнуто-выпуклых конических плитах, и даже такое элементарное решение, как переворот заготовки при её осадке в обычных бойках заметно улучшает равномерность протекающих в материале заготовки процессов, снижая разброс температур как на поверхности раздела поковки с инструментом, так и внутри самой поковки.

3. Ковка в (α+β)– состоянии, при условии подавления локализованных деформаций и разбиения застойных зон, позволит получить равномерную мелкозернистую трещиностойкую структуру заданных типов. Для этого следует ограничить температуру нагрева заготовок из сплава ВТ20 под деформацию в пределах 920…960 ^{0}С, что меньше рекомендованных действующими документами.

Библиографический список

1. Особенности применения титанового сплава ВТ20: ПИ1.2.105-79 / –М.: ВИАМ, 1979, -13 с.

2. http://www.qform3d.ru; e-mail: sales@qform3d.ru

3. Н.И. Корнеев, И.Г. Скугарев / Пластическая деформация высоколегированных сплавов / –М.: МАП, Оборонгиз, 1955. -204 с.

4. Ю.Н. Куренков, Г.Г. Москвичёв, С.М. Вдовин / О некоторых закономерностях развития пластической деформации при горячей деформации высоких заготовок / Алюминиевые сплавы и специальные материалы / Тр. ВИАМ, выпуск 9 / –М.: ВИАМ, ОНТИ, 1975. -300 с.

5. П.А. Головкин, С.А. Фесенко / Управление деформацией как инструмент обеспечения заданных структуры и свойств поковок из титановых сплавов / –М.: Технологии машиностроения, № 8 (74), 2008; с. 15…19.

6. М.Х. Рабинович, В.Г. Трифонов / Особенности механизма динамического роста зёрен при сверхпластической деформации / Металловедение, литьё и обработка сплавов / сб. тр. ВИЛС / –М.: ВИЛС, 1995. -293 с., с 37…48.

7. Б.А. Дроздовский, Л.В. Проходцева, Н.И. Новосильцева / Трещиностойкость титановых сплавов / –М.: «Металлургия», 1983, -192 с.

8. Расчёт нестационарных температур при осадке / Мурзов А.И., Позднеев В.Г. / Алюминиевые и специальные сплавы / Тр. ВИАМ, вып. 4. / Под ред. к.т.н. А.И. Мурзова / –М.: ВИАМ, – 1968, 340 с.; с. 218…225.

9. Г.И. Носова / Фазовые превращения в сплавах титана / –М.: «Металлургия», 1968. -180 с.

10. Производство полуфабрикатов с использованием осадки в выпукло-вогнутых плитах / Сборник статей под ред. Н.И. Корягина / –М.: ВИЛС, 1985. -158 с.

11. Инструкция ВИАМ № 1054-76 Металлографический анализ титановых сплавов / –М.: ВИАМ, 1976. -14 с.

12. Ю.Д. Хесин, С.М. Шулькин / Пластическая деформация и термическая обработка некоторых двухфазных сплавов титана / Металловедение. Сб. ст. № 2 / –Л.: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности. -1958. -268 с.: ил. -с. 251…265.